

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES TRANSFERTS DU GYPSE SUR UNE TOPOSEQUENCE DE SOLS DU SUD TUNISIEN

Par : P. ZANTE, & J. VIEILLEFON, Pédologues à l'O.R.S.T.O.M. (1981)

E-S 191

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION DES RESSOURCES
EN EAU ET EN SOL

Division des Sols

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES TRANSFERTS DU GYPSE
SUR UNE TOPOSEQUENCE DE SOLS DU SUD TUNISIEN

P. ZANTE & J. VIEILLEFON

Pédologues à l'O.R.S.T.O.M.

E-S 191

Juillet 1981

R É S U M É

Plusieurs campagnes d'étude du ruissellement et de l'érosion sur une toposéquence de sols représentatifs des piedmonts des djebels du Sud tunisien nous ont fourni la matière d'une approche de la dynamique du gypse. L'étude des analyses physico-chimiques des eaux et des sédiments recueillis à l'occasion d'un ensemble de crues représentatives du régime hydrologique a permis de dégager les mécanismes d'érosion, sous forme solide ou dissoute, observés sur les encroûtements gypseux, et de dépôt dans les sols situés à l'aval.

S O M M A I R E

Introduction	1
I- Principaux résultats des études sur le ruissellement et l'érosion sur la toposéquence du Djebel DISSA	3
I-1 Caractéristiques de la station	3
I-1-1 Dispositif expérimental	3
I-1-2 Nature des sols	4
I-2 Bilan hydrologique global	5
I-2-1 Pluviosité	5
I-2-2 Réponse des différents sols aux précipitations	6
I-2-3 Composition des eaux ruisselées	7
I-2-4 Importance et nature des transports solides	7
I-2-4-1 Quantification de l'érosion et du dépôt	7
I-2-4-2 Granulométrie comparée des sédiments	9
I-2-4-3 Composition chimique	10
II- Erosion, transport et dépôt du gypse	11
II-1 Mode d'approche	11
II-2 Etude des phénomènes d'ablation sur la parcelle III	12
II-2-1 Les facteurs de la répartition du gypse entre les fractions dissoute et sédimentée	12
II-2-1-1 Hauteur de pluie	12
II-2-1-2 Volume ruisselé	14
II-2-1-3 Intensité des pluies	14
II-2-1-4 Coefficient de ruissellement	14
II-2-2 Gypse total érodé	15
II-2-2-1 Charge totale	15
II-2-2-2 Erosion spécifique	16
II-2-3 Conclusion	16
II-3 Transport et absorption du gypse	17
II-3-1 Etude de l'érosion et du transport sur la parcelle II	18
II-3-1-1 Erosion spécifique	18
II-3-1-2 Influence du ruissellement sur le sierozem tronqué	20
II-3-2 Etude de l'absorption sur la parcelle I	23
II-3-2-1 Mise en évidence du phénomène	23
II-3-2-2 Calcul de l'absorption	25
II-3-2-3 Calcul du coefficient de ruissellement élémentaire du sierozem ensablé	26

II-3-2-4	Absorption du gypse en fonction du ruissellement sur le sierozem ensablé	27
II-4	Bilan interannuel de l'absorption du gypse sur la parcelle I	27
II-5	Essai de localisation des sites d'absorption du gypse	28
	Conclusion	30
	Bibliographie	31

INTRODUCTION

Si l'on ne possède pas encore de théorie bien assise pour expliquer le mode de formation des sols gypseux à croûte ou encroûtement de surface, très répandus dans le Sud tunisien, on ne disposait pas de plus de données sur leur évolution actuelle.

Si certains ont voulu y voir des paléosols, témoins de périodes moins arides du Quaternaire (LE HOUEROU, 1969), d'autres pensent que leur développement est encore possible sous le climat actuel (BUREAU & ROEDERER, 1961). Cependant, sols actuels ou non, on peut penser que, étant formés d'un matériau dominant de solubilité non négligeable, ils fournissent, même sous l'influence des faibles précipitations du climat actuel, une part importante des transferts de matière que l'on peut observer dans ce contexte pédologique.

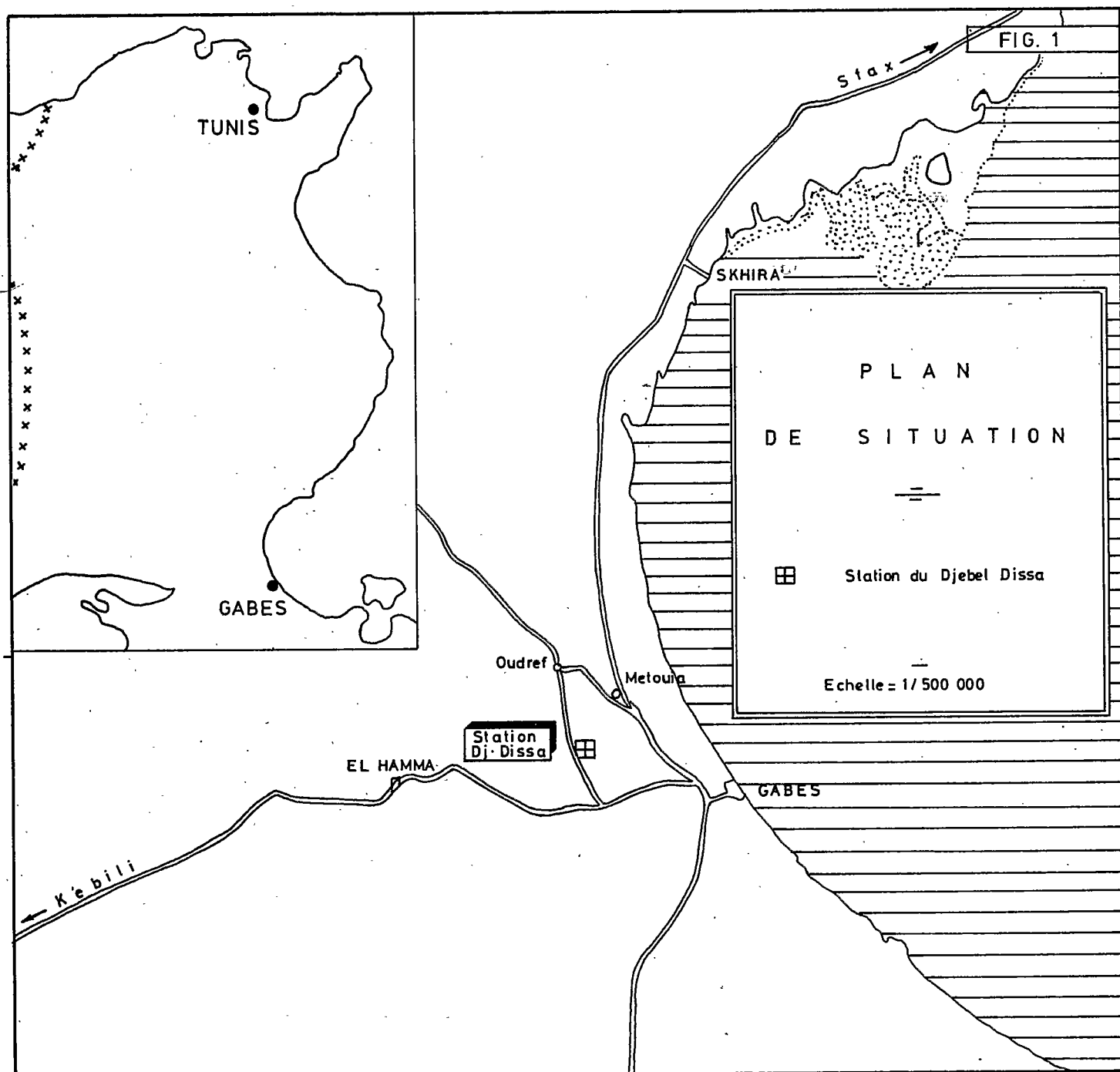
La continuité des mesures nécessaires pour se faire une idée suffisamment claire de ces phénomènes, imposait qu'elles soient réalisées dans le cadre d'une étude pluriannuelle sur des sols représentatifs de ces formations. Cette étude fait donc suite aux recherches effectuées sur la station du Djebel DISSA (figure 1), en vue d'améliorer la connaissance du milieu présaharien dans le Sud tunisien et vient en compléter l'analyse.

Les recherches effectuées de 1972 à 1977 avaient pour but d'étudier, sur une toposéquence type de la région de Gabès, l'influence des différents paramètres liés au climat, au sol et à la végétation sur le ruissellement et l'érosion ; les résultats acquis ont été consignés dans trois rapports de campagne (BOURGES-FLORET-PONTANIER, 1973 et 1975 ; FERSI & ZANTE, 1979) et un rapport de synthèse (FERSI & ZANTE, 1980). Dans ce dernier rapport sont dégagées les caractéristiques des principaux paramètres climatiques et du bilan d'eau ; le bilan d'eau interne permet de suivre les variations de la réserve en eau des sols, les transferts d'eau le long de la toposéquence et de donner une estimation mensuelle de l'évapotranspiration réelle, à partir des mesures et selon une loi approchée. En ce qui concerne le ruissellement, il a été élaboré un modèle de calcul des lames ruisselées et des débits, compte tenu de l'état du stock d'eau dans le sol au début des pluies.

Enfin l'étude de l'érosion, sous les aspects qualitatif et quantitatif, montre que l'érosion hydrique ne paraît active qu'en de rares périodes de crues exceptionnelles. Il apparaît cependant que les transports hydriques de matériaux peuvent affecter la distribution des sols et le micromodèle le long de la toposéquence

D'autre part, les résultats qualitatifs obtenus laissent supposer qu'il existe sur ces versants une certaine dynamique du gypse. C'est donc à l'examen plus détaillé de ces phénomènes qu'est consacrée la présente étude.

Après avoir sommairement décrit le cadre de ces recherches et son dispositif expérimental, nous passerons rapidement en revue l'analyse du bilan hydrologique global, avant de tenter d'expliquer les mécanismes en jeu et d'évaluer l'intensité des transferts du gypse.



I PRINCIPAUX RÉSULTATS DES ÉTUDES SUR LE RUISSELLEMENT ET L'ÉROSION SUR LA TOPOSÉQUENCE DU DJEBEL DISSA

I-1 Caractéristiques de la station

La station installée sur le flanc ouest du Djebel Dissa, à 16 km de GABES, dont le bas du versant est constitué de dépôts alluviaux, colluviaux et éoliens du quaternaire récent, surmontant une formation argilo-sableuse riche en gypse du Miopliocène, adossée à un relief calcaire du Crétacé (des calcaires blancs en relief tabulaire couronnant le sommet), comporte trois parcelles permettant d'étudier, en une séquence cumulative, les principaux sols des versants (figure 2).

I-1-1 Dispositif expérimental

On se reportera pour plus de détail à l'étude initiale de BOURGES et al, (1973).

La parcelle I (figure 3), ceinturée comme les deux autres par des plaques en éternit enfoncée de 20 cm, et équipée à l'aval d'un système de mesure du ruissellement et des transports solides, couvre 3650 m² (183 m de long sur 20 de large), sous une pente moyenne de 7,9 % (avec 10,9 % dans la partie amont). Elle intéresse les trois principaux types de sol.

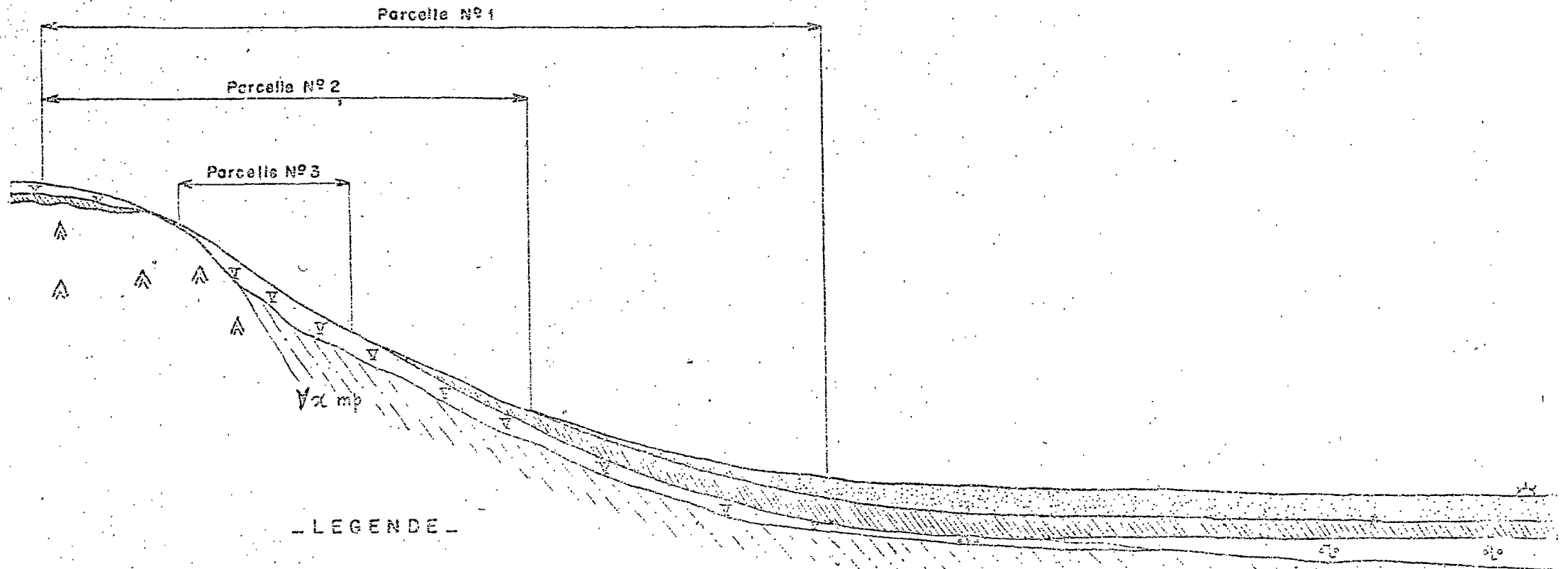
La parcelle II, de 590 m² (59,2 m sur 10 m), sous une pente régulière de 8,7 % ne comporte que les deux types de sol de l'amont.

La parcelle III, encore plus réduite (87 m² en 18,7 m par 5 m), sous une pente de 8,4 %, ne comprend que les sols de l'amont gypseux.









Le dispositif de mesure, en sus des fosses de décantation et des instruments permettant la mesure du ruissellement, ainsi que du réseau pluviométrique, comporte des points de mesure régulière des profils hydriques et des placettes de mesure constituées d'un réseau d'aiguilles dépassant de 40 mm le niveau du sol en début d'expérimentation. (Mesure de l'érosion)

Figure.2

COUPE SCHEMATIQUE MONTRANT LA REPARTITION DES MATERIAUX SUR LA STATION DU DJEBEL DISSA.



LEGENDE

- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | Calcaires durs du Sénonien inférieur |  | Matériau sablo-argileux à nodules calcifiés. |
|  | Argiles sableuses gypseuses du miocène |  | Horizon sablo-argileux à sablo-limoneux à accumulation de nitrate |
|  | Croûtes et encroûtements gypseux |  | Horizon sableux à sablo-limoneux |
|  | Encroûtements calcaire-gypseux |  | Nebka |

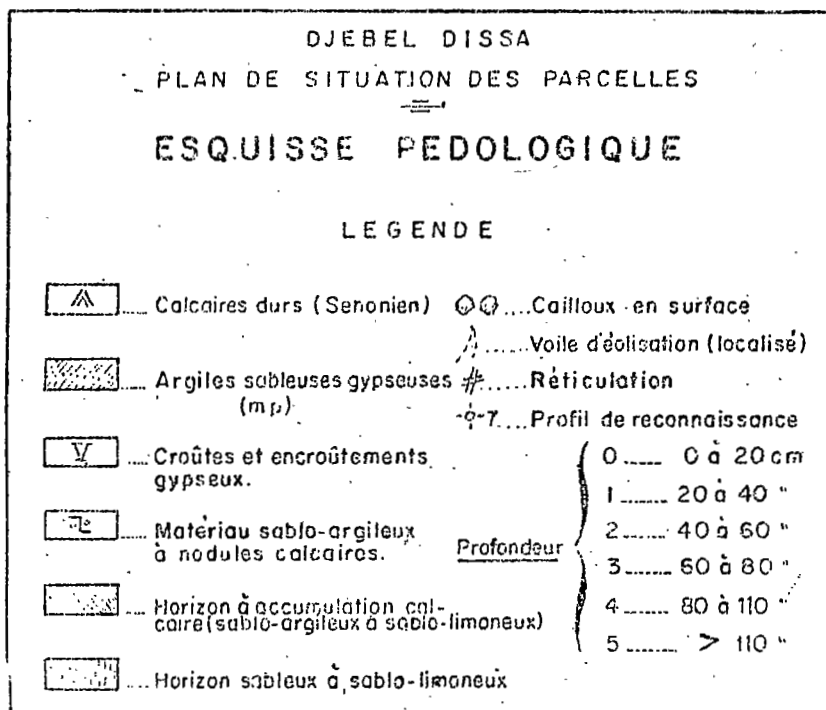
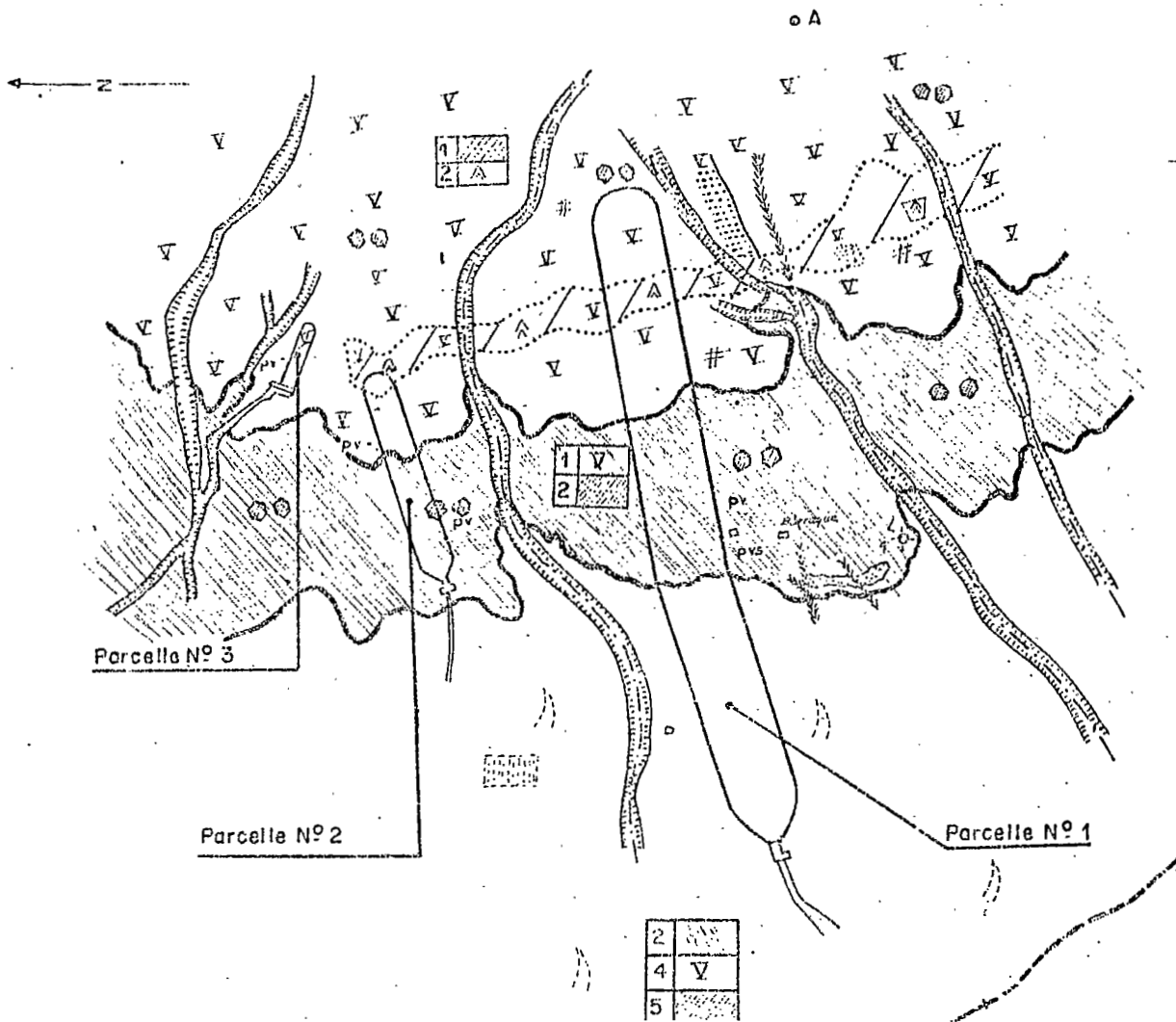


Figure 3

d'après BOURGES et al (1973)

I-1-2 Nature des sols (tableau I)

Les trois principaux types de sol, dont la succession régulière sur les versants a été maintes fois observée, sont brièvement décrits ci-après.

a) Sierozem modal ou ensablé

Sous un voile éolien de 2 à 5 cm d'épaisseur, de répartition discontinue, on trouve :

- un horizon sableux à sablo-limoneux de 10 à 50 cm d'épaisseur,
- un horizon sablo-limoneux à sablo-argileux, à accumulation calcaire, de 25 à 40 cm,
- un horizon plus ou moins encroûté par le gypse, épais lui aussi de 25 à 40 cm, et reposant sur une formation plus ou moins altérée du Mio-pliocène, également enrichie en calcaire et en gypse (32 et 35 %).

Ce sol représente 42 % de la surface de la parcelle I ; il est absent des autres parcelles.

b) Sierozem tronqué

Sous la surface parsemée de nombreux débris grossiers, pierres, cailloux et graviers calcaires, ce sol est constitué de l'horizon à accumulation calcaire, dont la surface est battante, d'épaisseur variant de 5 à 40 cm de l'amont à l'aval, reposant sur un encroûtement gypseux issu du Mio-pliocène qui lui succède en profondeur.

Le sierozem tronqué couvre 26 % de la parcelle I et 58 % de la parcelle II. Il est absent de la parcelle III.

c) Croûte et encroûtement gypseux de surface

La croûte superficielle, discontinue, mesure 1 à 5 cm d'épaisseur. Elle repose sur l'encroûtement qui a été subdivisé en deux horizons :

- un horizon blanc tuffeux de 10 à 30 cm d'épaisseur,
- un horizon plus jaune de 30 à 80 cm.

Ce sol représente 32 % de la parcelle I, 42 % de la parcelle II et donc 100 % de la parcelle III.

Il est très riche en gypse, sa teneur avoisinant 70 % dans les horizons supérieurs.

Du fait du recouvrement en biseaux successifs des dépôts sablo-argileux et sablo-limoneux, l'épaisseur des horizons situés au-dessus de l'encroûtement augmente de l'amont vers l'aval. (figure 2)

TABLEAU n° 1

Djebel DISSA - Répartition des types de sol sur les parcelles

N° Parcelle	Sierozem modal ou ensablé	Sierozem tronqué	Croûte ou encroû- tement gypseux
1	1440 m ² (42 %)	970 m ² (26 %)	1240 m ² (32 %)
2	0 (0 %)	360 m ² (58 %)	230 m ² (42 %)
3	0 (0 %)	0	87 m ² (100 %)

I-2 Bilan hydrologique global

I-2-1 Pluviosité

La figure n° 4 illustre la grande variabilité interannuelle et intermensuelle du volume des pluies et de leur répartition dans le temps au cours de la période d'étude de la toposéquence.

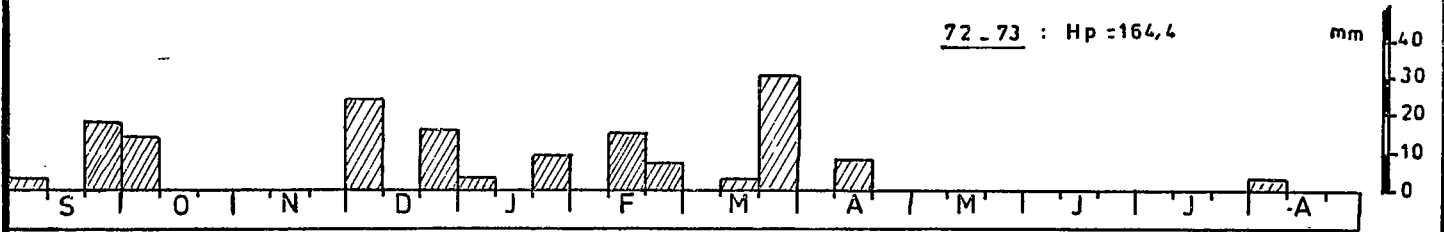
Cette variabilité temporelle aléatoire est doublée d'une variabilité spatiale systématique entre les parcelles de la station. On a ainsi observé les variations suivantes des hauteurs de pluie :

- . en 1973-74 : de 272,7 mm sur P1 à 242,6 mm sur P3
- . en 1974-75 : de 199,0 mm sur P1 à 176,1 mm sur P3
- . en 1975-76 : de 416,0 mm sur P1 à 384,4 mm sur P3
- . en 1976-77 : de 103,2 mm sur P1 à 98,4 mm sur P3.

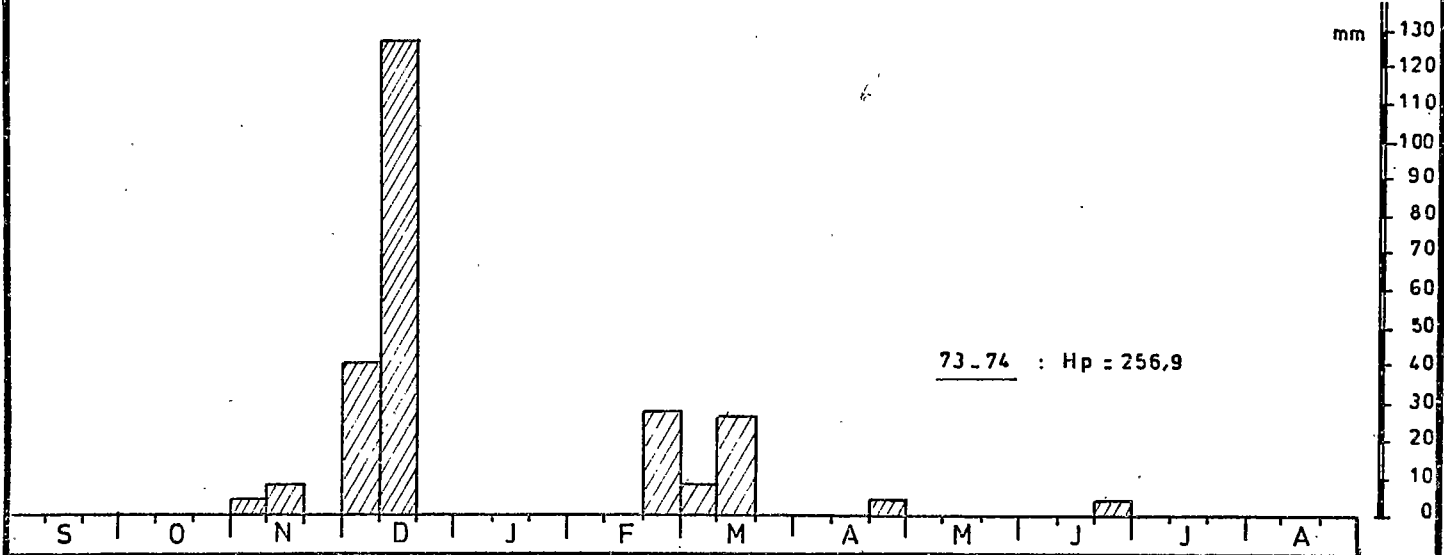
DISSA - REPARTITION DECADEIRE DE LA PLUVIOSITE

1972 à 1977

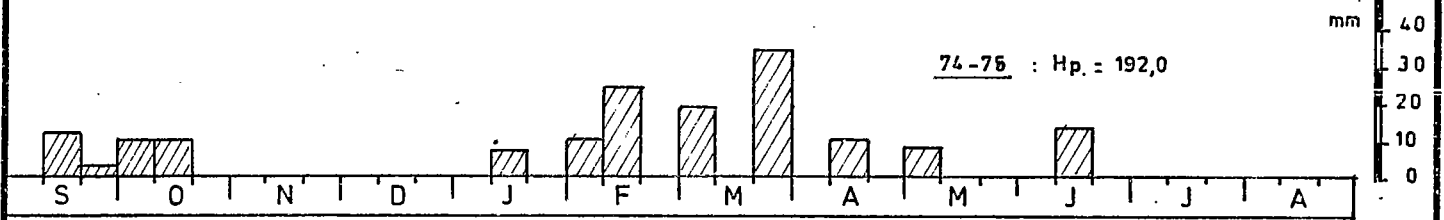
72-73 : Hp = 164,4



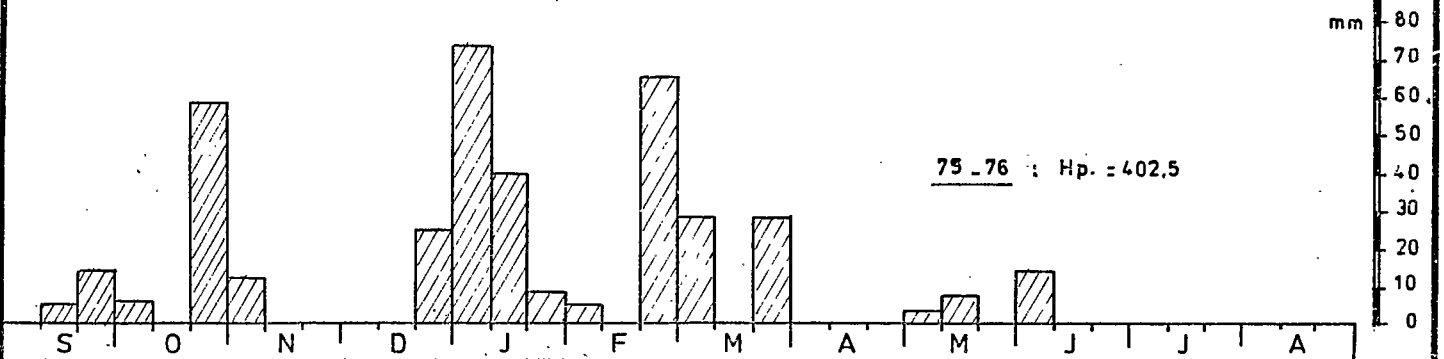
73-74 : Hp = 256,9



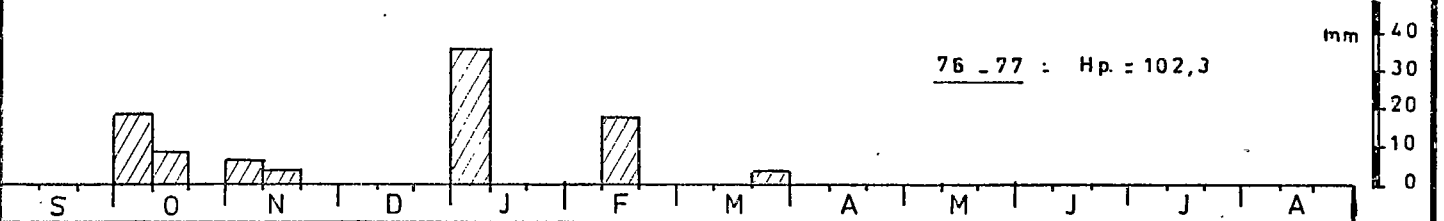
74-75 : Hp = 192,0



75-76 : Hp = 402,5



76-77 : Hp = 102,3



Le classement des pluies montre que le nombre de jours de pluies inférieures à 5 mm est très important puisqu'il varie selon les années de 50 à 80 % du nombre total de jours de pluie dans l'année.

Par contre, la contribution des pluies de moins de 5 mm au total annuel est faible puisqu'elle varie de moins de 6 % en 1975-76 à 33 % en 1972-73 et 1976-77 qui sont aussi les deux années à la pluviosité la plus faible. En 1973-74, les deux pluies supérieures à 30 mm contribuent à elles seules pour plus de 60 % à la hauteur totale annuelle précipitée, dont 46 % pour la pluie exceptionnelle du 12.12.1973.

1975-76, année exceptionnelle avec 402,4 mm de pluie, a par contre une meilleure répartition puisque les trois pluies supérieures à 30 mm n'interviennent que pour 40 % dans la constitution du total annuel de pluie. Cette année est surtout remarquable par l'abondance des pluies comprises entre 10 et 30 mm ; avec 35 % du nombre total de pluies elles contribuent pour 50 % à la hauteur totale annuelle.

Les averses génératrices de crue ont une intensité moyenne du corps principal supérieure à 10 mm/H (BOURGES et al., 1973).

Les coefficients de ruissellement varient de 0,4 à 38 % pour la parcelle 1, de 1 à 56 % pour la parcelle 2 et de 1 à 85 % pour la parcelle 3.

I-2-2 Réponse des différents types de sols aux précipitations

Le suivi régulier des variations d'humidité dans les différents types de sols constituant les toposéquences nous montre :

- que la variation maximale moyenne du stock d'eau sur les 5 ans d'étude est de l'ordre de 90 mm pour les sierozems, 100 mm pour les sierozems ensablés, 75 mm pour les sierozems tronqués et 70 mm pour les croûtes gypseuses. Les variations maximales les plus fortes ont été enregistrés en 1975-76; elles s'élèvent à 150 mm pour les sierozems, 165 mm pour les sierozems ensablés, 130 mm pour les sierozems tronqués et 125 mm pour les croûtes gypseuses.
- que la profondeur de sol concernée par les transferts d'eau est de l'ordre de 110 cm à 130 cm pour les sierozems ; 80 cm pour les sierozems tronqués et 50 cm pour les croûtes gypseuses et encroûtements gypseux situés sur le haut des parcelles la réserve en eau utile étant pour ces profondeurs et pour ces sols respectivement de : 125 mm, 82 mm et 45 mm. Sauf pour les croûtes gypseuses l'humidité des profils n'atteint pratiquement jamais la capacité au champ.

- que tous les profils sont revenus chaque année à leur état de sécheresse initiale, même en 1975-76 alors qu'il avait plu 402,5 mm. Il faut alors qu'il tombe 15 à 20 mm d'eau en une seule pluie pour amener les 50 premiers centimètres des sierozems à pF 4,2.
- que le coefficient d'efficacité des pluies ($K_e = \frac{\text{Pluie}}{\text{Infiltration}}$), en moyenne sur les 5 années, est de 93 % sur sierozem modal, 105 % sur sierozem ensablé, 85 % sur sierozem tronqué et 83 % sur les croûtes ou encroûtements gypseux.

On note également (fig. n° 5) que le sol gypseux absorbe sur 30 cm d'épaisseur plus d'eau que le sierozem mais qu'il est vite saturé et ruisselle rapidement. Ce n'est donc que pour les faibles pluies qu'il peut montrer une capacité d'absorption supérieure à celle du sierozem, sur lequel se développe parfois une pellicule de battance qui joue un rôle important sur le ruissellement.

I-2-3. Composition chimique des eaux de ruissellement

L'analyse des eaux recueillies sur les trois parcelles indique toujours une prédominance des ions SO_4^{--} et Ca^{++} , qui représentent en moyenne 92 % des sels transportés sur la parcelle III. C'est donc le gypse dissout qui assure la plus grande partie du résidu sec mesuré qui, encore pour la parcelle III, varie de 0,80 à 1,86 g/l.

Les chlorures sont peu abondants ; cependant, le rapport Cl/SO_4 passe de 0,05 pour la parcelle III à 0,12 pour la parcelle I.

On observe également (BOURGES et al., 1975) qu'il existe dans la fosse de décantation relativement plus de sulfates que dans le ruissellement instantané d'une même crue. On montrera plus loin qu'il faut en effet tenir compte de transformations possibles (dissolution ou précipitation) au cours de la décantation des eaux ruisselées.

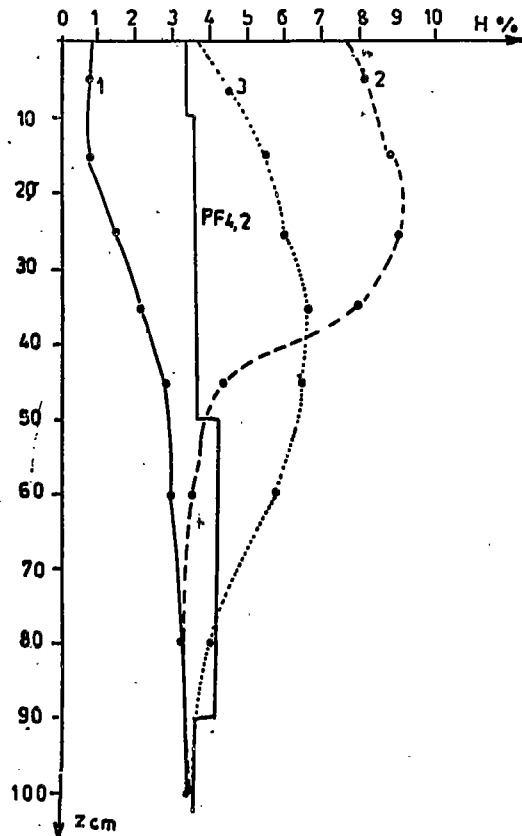
I-2-4 Importance et nature des transports solides

I-2-4-1 Quantification de l'érosion et du dépôt

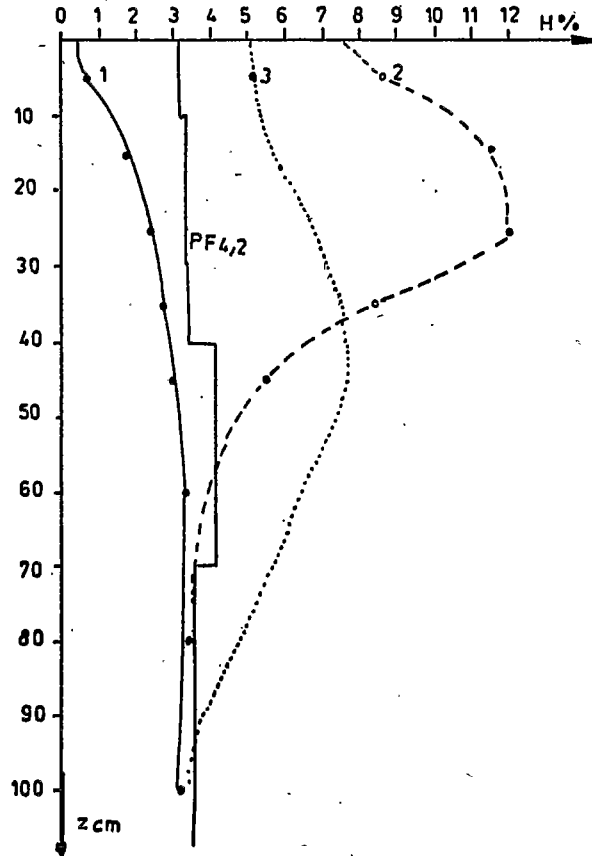
Le tonnage transporté est évidemment variable d'une parcelle à l'autre et fonction de l'intensité et de la durée de la pluie. Ainsi, le 12.12.73, les fosses ont ainsi récupéré 3,9 tonne/hectare sur les parcelles II et III, contre seulement 0,8 pour la parcelle I.

REACTION DES DIFFERENTS TYPES DE SOL A UNE PLUIE DE 50mm

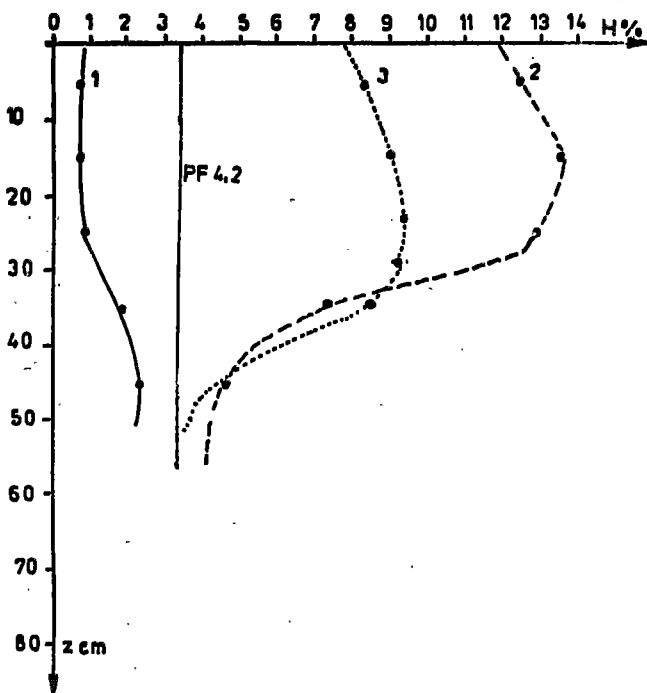
SIEROZEM



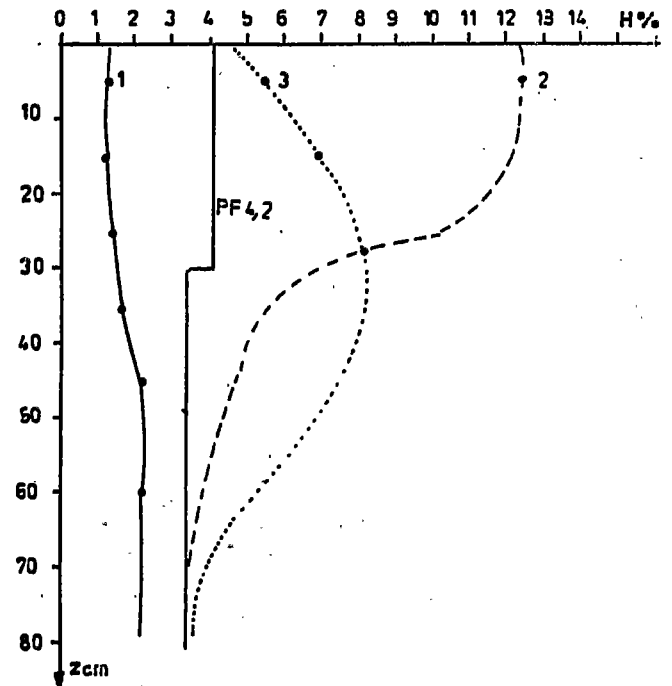
SIEROZEM ENSABLE



CROUTE GYPSEUSE



SIEROZEM TRONQUE



- 1. — Profil hydrique initial en fin d'été
- 2. - - - Profil hydrique après ressuyage
- 3. ····· Profil hydrique 15 jours après la pluie

On trouvera dans le tableau II le relevé des tonnages transportés au cours de 4 campagnes de mesures sur les 3 parcelles. On remarquera l'importante contribution de la crue exceptionnelle du 12.12.73. Notons en outre que l'on n'a pas observé d'érosion hydrique en 1972-73.

TABLEAU II

Erosion hydrique 1973-1977 (en T/km²)

Parcelle	73-74	12.12.73	74-75	75-76	76-77	TOTAL
I	87,4	80,9	34,7	47,3	4,8	174,3
II	402,9	387,9	152,9	218,1	37,1	811,1
III	412,7	393,2	401,5	357,8	55,2	1227,2

Pour les 5 ans, l'érosion moyenne s'établit donc à 35 T/km²/an pour la parcelle I, 162 T/km²/an pour la parcelle II et 240 T/km²/an pour la parcelle III. L'année 1973-74, avec la crue exceptionnelle du 12.12.73, représente à elle seule 46 % de l'érosion totale enregistrée sur les parcelles I et II ; par contre, sur la parcelle III, l'érosion a été du même ordre de grandeur en 1974-75 et 1975-76 qu'en 1973-74.

Ainsi l'érosion sur la parcelle I est environ 5 à 10 fois moins forte que sur la parcelle III. L'importance des apports de la crue du 12.12.73 montre que l'on n'assisterait donc à des transferts importants mais limités dans l'espace que lors d'évènements pluviométriques exceptionnels.

En outre, la répartition des sols sur chacune des parcelles permet d'estimer la part de l'érosion hydrique totale relative à chaque type de sol, en prenant pour hypothèse que les croûtes gypseuses formant l'amont des parcelles I et II s'érodent de la même façon que celles qui constituent la parcelle III, soit un total de 1227 T/km² pour la période 72-77.

Pour connaître l'érosion effective sur le sierozem tronqué, puis sur le sierozem modal, il suffit de faire intervenir les surfaces respectives de ces sols sur les parcelles II, puis I. Ainsi, pour la parcelle II, l'érosion totale étant de 811 T/km² pour une surface totale de 590 m², soit 0,478 T, et l'érosion rapportée aux croûtes gypseuses se montant à 1227 T/km² x 230 m² = 0,282 T, l'érosion relative au sierozem tronqué atteindrait 0,478 - 0,282 = 0,196 T, soit 544 T/km².

Le même raisonnement appliqué à la parcelle I permet de calculer non plus une érosion, mais au contraire un dépôt important, s'élevant à 1,412 T, soit 980 T/km², sur les sierozem modal et ensablé, soit un peu moins seulement que ce qui est apparemment érodé sur les croûtes gypseuses.

Par ailleurs, l'observation des placettes d'érosion à aiguilles indique d'assez fortes divergences entre les mêmes sols des différentes parcelles, soit :

- une érosion de 12,6 25,6 et 23,3 m³/ha pour les sols gypseux des parcelles III, II et I,
- une érosion de 26,5 et 1,6 m³/ha pour les sierozem tronqués des parcelles II et I,
- un dépôt de 85,5 m³/ha pour le sierozem ensablé de la parcelle I.

Il semble que ces divergences soient plus liées à l'érosion éolienne et donc à des apports latéraux, la mise en défens ayant par ailleurs contribué au piégeage des apports grâce à un meilleur développement de la végétation. Cependant l'absence de piétinement par les troupeaux pourrait avoir un effet inverse en ne détruisant pas la pellicule de battance qui favorise le ruissellement.

I-2-4-2 Granulométrie comparée des sédiments

La composition granulométrique moyenne des sédiments a été comparée à celle de la tranche supérieure (0-2 cm) des différents sols constituant les parcelles, en effectuant une pondération par leurs surfaces respectives (tableau III). Ce dernier calcul suppose que l'érodibilité des différents sols est comparable, ce qui n'est pas prouvé. Il permet seulement de différencier les parcelles.

TABLEAU III

Composition comparée des sédiments et des sols en place

%	Parcelle I		Parcelle II		Parcelle III	
	en place	sédim.	en place	sédim.	en place	sédim.
argile	6,4	9,3	7,7	10,0	5,1	11,0
lim. fin	6,9	10,4	9,9	7,8	14,4	7,8
lim. gros	7,4	9,7	9,1	11,9	9,3	19,2
sable fin	66,6	52,0	60,6	55,6	52,6	55,4
sable gros.	12,9	18,0	12,3	14,4	18,5	6,5
mat. orga.	0,3	3,3	0,3	1,7	0,3	1,6
calcaire	9,5	13,2	10,8	12,7	4,2	12,1
gypse	27,1	1,6	26,5	3,5	68,0	8,2

On n'observe cependant pas de différences très importantes sur la granulométrie mais un simple glissement des valeurs d'une parcelle à l'autre. Ainsi, pour les différentes fractions, on note :

- argile : toujours un peu plus d'argile dans le sédiment que dans le sol en place, l'augmentation la plus forte concernant la parcelle III qui voit la teneur doubler (5,1 à 11,0 %),
- limon fin : diminution pour les parcelles II et III, au contraire augmentation pour la parcelle I,
- limon grossier : peu de changement sur les parcelles I et II, mais forte augmentation sur la parcelle III,
- sable fin : pas de changements pour les parcelles II et III et faible diminution pour la parcelle I,
- sable grossier : on passe d'une forte diminution sur la parcelle III à une augmentation moyenne sur la parcelle I.

En complément les exportations de matière organique sont notablement plus élevées. On en trouve ainsi 10 fois plus dans les sédiments issus de la parcelle I que dans le sol en place.

I-2-4-3 Composition chimique

La teneur en calcaire total est sensiblement identique dans les sédiments des trois parcelles, et supérieure à celle des sols en place, notamment pour la parcelle III.

Par contre, la teneur en gypse est nettement plus faible que dans le sol en place, bien que l'on observe une augmentation très nette de la parcelle I à la parcelle III. Entre la parcelle II et la parcelle III, cette augmentation est dans le rapport des surfaces gypseuses respectives, puisque l'on passe de 3,5 à 8,2 % quand le pourcentage de sol gypseux passe de 40 % à 100 %, mais de la parcelle II à la parcelle I la diminution est relativement plus forte, ce qui peut être interprété comme l'indice d'un piégeage partiel sur les sierzems modaux et ensablés de la partie aval de la parcelle I.

II ÉROSION, TRANSPORT ET DÉPÔT DU GYPSE

II-1 Mode d'approche

Rappelons que croûtes et encroûtements gypseux représentent respectivement 1/3, 4/10 et la totalité des parcelles I, II et III, et qu'ils se situent par ailleurs à la partie supérieure des parcelles I et II, à l'amont des sierozems. Il a donc semblé possible d'étudier les phénomènes d'érosion et de dépôt du gypse en comparant les caractéristiques des eaux et des sédiments recueillis au cours des épisodes suivis sur les trois parcelles. Après avoir éliminé les cas où certains résultats sont absents ou douteux, l'étude comparative a pu porter sur 17 épisodes pluvieux caractéristiques, de durée, d'intensité et de volume variés.

La quantité totale de gypse recueillie dans les cuves provient de deux analyses différentes et complémentaires :

- la teneur en gypse dans les sédiments décantés et séchés,
- la teneur en sulfates de l'eau après décantation.

Dans le premier cas, on obtient le poids de gypse dans le sédiment par

$$P_{\text{sed}} \text{ kg} \times \text{Gypse } \% \times 10 = \text{gypse "sédimenté" en grammes}$$

et, dans le second, par

$$\frac{\text{SO}_4 \text{ mgr/l} \times 1,79 \times V_1}{1000} = \text{gypse "dissout" en grammes}$$

Les termes de gypse "dissout" ou "sédimenté" ne sont employés ici que pour diversifier l'origine des chiffres obtenus, mais ne constituent pas une qualification exclusive. En effet, si l'on peut admettre que des phénomènes de transport solide, autant que des phénomènes de dissolution, peuvent s'associer dans les processus d'érosion des croûtes gypseuses, on ne peut affirmer que ce que l'on recueille respectivement dans l'eau et le sédiment correspond exactement aux quantités entraînées sous les deux formes dissoute et solide, car il est probable que tant au cours du ruissellement que du dépôt dans les fosses, dissolution et précipitation peuvent se produire et masquer les phénomènes initiaux. Cependant, malgré cette restriction qu'il faut garder à l'esprit, on verra que les proportions respectives de ces deux formes sont liées à la dynamique érosive.

On étudiera successivement les phénomènes d'érosion, chimique ou mécanique, du gypse, sur les croûtes et encroûtements de la parcelle III, avant de suivre le transport, le dépôt ou l'infiltration possibles, sur les autres sols des autres parcelles.

II-2 Etude des phénomènes d'érosion sur la parcelle III

L'analyse de l'érosion du gypse repose sur un certain nombre de données qui sont rassemblées dans le tableau IV :

- les caractéristiques de la pluie : hauteur (H_p mm), l'intensité selon différents pas de temps (I_t mm/h),
 - les caractéristiques du ruissellement : volume (V l), débit (Q mm/h),
 - les caractéristiques des eaux ruisselées : teneur en sulfates,
 - les caractéristiques des sédiments : poids, teneur en gypse,
- enfin celles des parcelles : surfaces, longueur, pente.

L'essentiel des données du tableau IV provient des observations rassemblées sur la parcelle III, à l'exception des intensités qui proviennent des pluviographes de la parcelle II ou à défaut, de la parcelle I. Les données du 27.10.75 sont simplement estimées, un incident étant survenu au fût partiteur de réception, d'où une probable sous-estimation du volume ruisselé.

Les quantités de gypse "dissout", "sédimenté" ou total peuvent être exprimées, soit par rapport au volume d'eau total, et traduites en g/l et c'est alors la charge totale, soit par rapport à la surface de la partie gypseuse de la parcelles, en g/m^2 , et c'est l'érosion spécifique.

II-2-1 Les facteurs de la répartition du gypse dans les eaux et les sédiments de la parcelle III

II-2-1-1 Hauteur de pluie

Pour des pluies comprises entre 2,8 et 112,4 mm (crue du 12.12.73), la teneur en gypse dissout varie de 0,81 à 2,11 g/l, tandis que dans le sédiment la teneur en gypse varie de près de 0 à 14 %.

TABLEAU IV

Caractéristiques des pluies et des transports de gypse sur la parcelle III

Date	Hp mm	VI	Kr %	Gypse "dissout"		Gypse "sédimenté"		Gypse total			I mm/h			I moyenne
				mg/l	g	%	g	g	g/l	g/m ²	5'	15'	30'	
4.12.73	36,2	470	14,9	997	468,6	5,5	93,3	561,9	1,19	6,46	20	24,8	19,6	6,8
12.12.73	112,4	5568	57,5	1357	7554,7	12,2	4379,8	11834,5	2,12	136,03	150	-	-	10,0
21.09.74	18,4	313	19,5	1253	392,2	9,0	477	869,2	2,78	9,99	-	-	-	-
10.10.74	8,0	287	42,0	1504	431,5	1,0	67	498,5	1,74	5,74	72	45,2	22,8	33,1
15.10.74	7,4	557	86,5	1237	688,9	12,0	516	1204,9	2,16	13,85	-	-	-	-
10 11.02.75	4,8	43	10,4	1069	45,9	tr	-	45,9	1,07	0,53	21	16	10	7,0
22.03.75	31,7	96	3,5	931	89,3	2,0	6,7	96,0	1,00	1,10	-	17,6	12,8	5,6
5.05.75	4,4	17	4,5	2114	35,9	3,0	9,3	45,2	2,66	0,52	24	10,4	5,2	-
6.05.75	2,8	17	7,1	1385	23,5	1,0	2,8	26,3	1,55	0,30	24	14,4	7,2	-
18.06.75	9,7	357	42,2	1847	659,5	2,0	460	1119,5	3,13	12,87	120	-	-	-
25.09.75	12,6	644	58,7	1471	947,3	5,0	350	1297,3	2,01	14,91	-	-	-	-
27.10.75	43,5	(1348)	(35,6)	1335	(1800)	14,0	2156	(3956)	(2,93)	(45,47)	69,4	61,6	38,8	15,2
9.01.76	74,1	1966	31,5	941	1851	1,0	29,9	1880,9	0,96	21,62	40,8	40,8	21,2	7,3
14.01.76	39,5	113	3,3	1095	123,8	tr	-	123,8	1,09	1,42	12,0	11,2	9,4	-
24 28.02.76	61,9	548	10,2	1289	706,3	2,0	80	786,3	1,43	9,04	28,8	21,2	11,2	-
10.03.76	26,0	487	21,5	924	449,8	3,0	60	509,8	1,05	5,86	24,0	18,4	16,4	8,1
8.01.77	29,0	810	32	811	656,8	12,0	576	1232,8	1,52	14,17	88,0	41,6	28,0	11,3

Dans l'ensemble, les quantités de gypse "dissout", "sédimenté" et total augmentent avec la hauteur de pluie, mais sans relation nette.

II-2-1-2 Volume ruisselé

Pour cette donnée, la figure 6 montre une bonne relation avec le gypse "dissout" (poids de gypse dissout en g = $1,36 V_1 - 48,64$ avec $r = 0,997$).

Avec le gypse sédimenté, l'augmentation ne devient nette qu'à partir d'un volume de 500 litres, et rejoint la quantité-dissoute pour un volume supérieur à 1300 litres. Quant au gypse total, il croît rapidement pour se stabiliser vers 500 litres, puis reprend une croissance rapide au-dessus de 2000 litres. L'effet "dissolution" serait donc relativement constant et proportionnel au volume ruisselé, tandis que l'effet "arrachement" ne serait sensibles que pour des volumes relativement importants.

On observe enfin que dans la plupart des cas, on relève des teneurs en gypse "dissout" supérieures à celles du gypse "sédimenté"

II-2-1-3 Intensité des pluies

Quand l'intensité, calculée par exemple ici sur 30 minutes, croît, la teneur en gypse "dissout" diminue, ce qui traduirait une moindre capacité de dissolution des écoulements liés aux fortes intensités (figure 7).

II-2-1-4 Coefficient de ruissellement

Comme nous ne disposons pas de mesures d'intensité pour les 17 épisodes que nous avons pris en compte, nous avons utilisé le coefficient de ruissellement ($K_r \%$), qui ne rend compte qu'imparfaitement de l'aspect intensité des précipitations mais se calcule facilement à partir de la hauteur de pluie et de la lame ruisselée.

On remarque ainsi que le rapport gypse "dissout" / gypse "sédimenté" diminue quand K_r augmente (figure 8), mais que les variations pondérales de ces fractions et du gypse total suivent des courbes différentes et décalées : on voit en effet sur la figure 9, sur un graphique semi-logarithmique, que le gypse "dissout" suit grossièrement une courbe en "S", la masse dissoute augmentant très rapidement quand K_r croît, tandis que la charge solide, et la masse totale augmentent d'une manière exponentielle avec K_r (\log poids de gypse total en g = $0,031 K_r + 2,04$ avec $r = 0,719$).

GYPSE ERODE SUR LA PARCELLE III EN FONCTION DU VOLUME RUISSELE

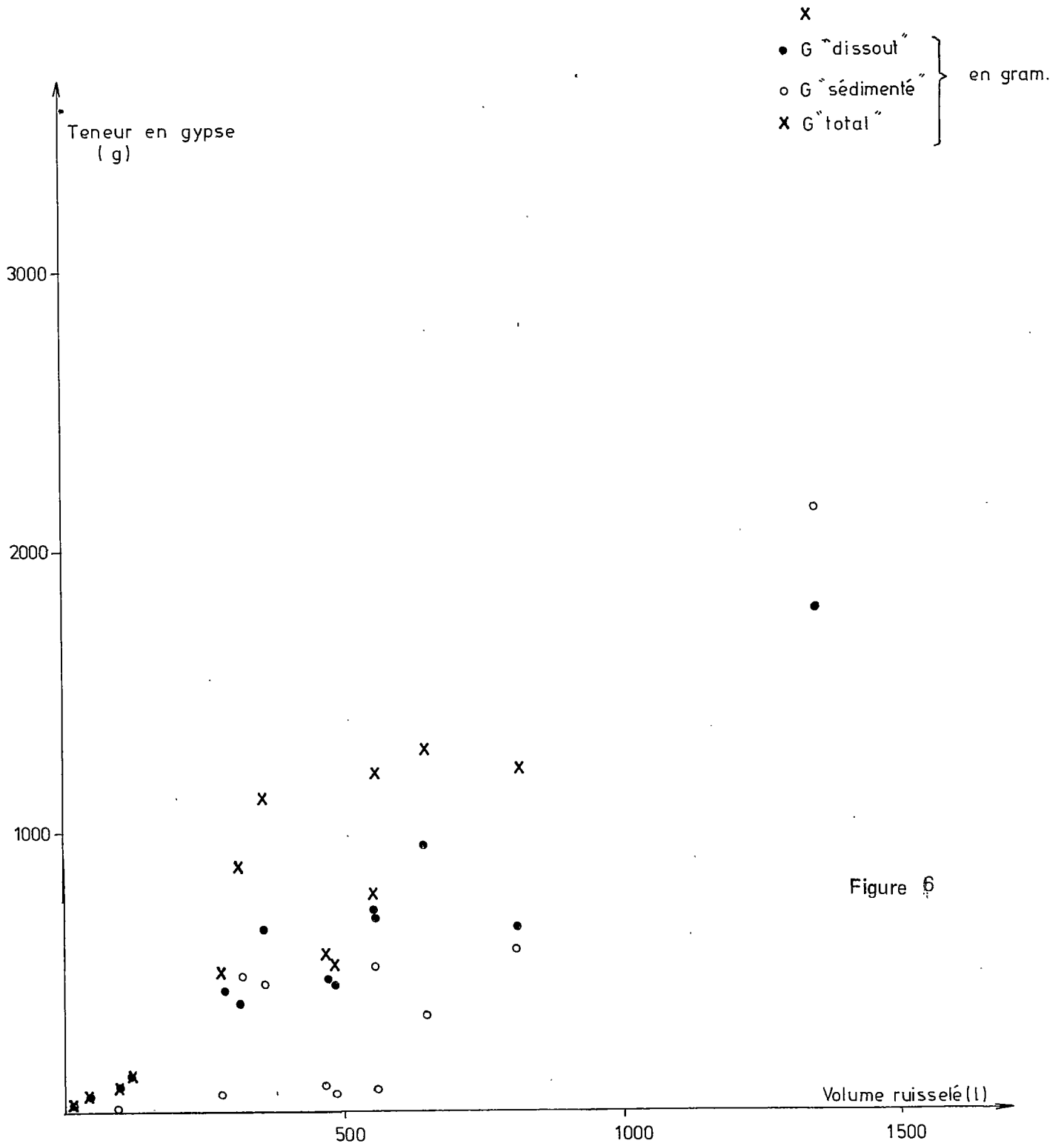


Figure 6

gypse
dissout
mg/l.

2200
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800

TENEUR EN GYPSE DISSOUT NE FONCTION DE L'INTENSITE
DE LA PLUIE

0 10 20 30 40 I 30' mm/h.

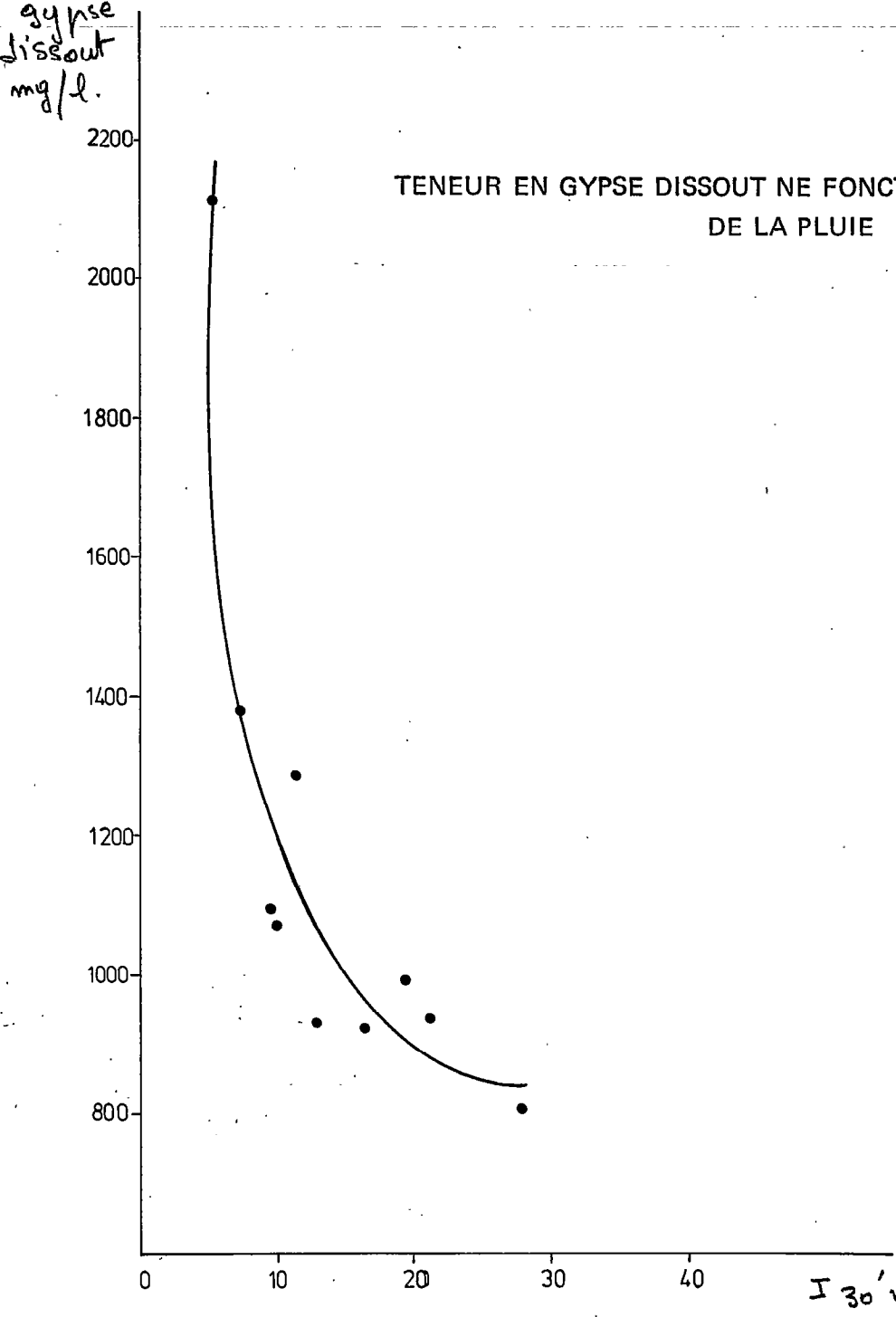


Figure 7

EVOLUTION DU RAPPORT GYPSE DISSOUT - GYPSE SEDIMENTE EN FONCTION DU
COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT SUR LA PARCELLE III

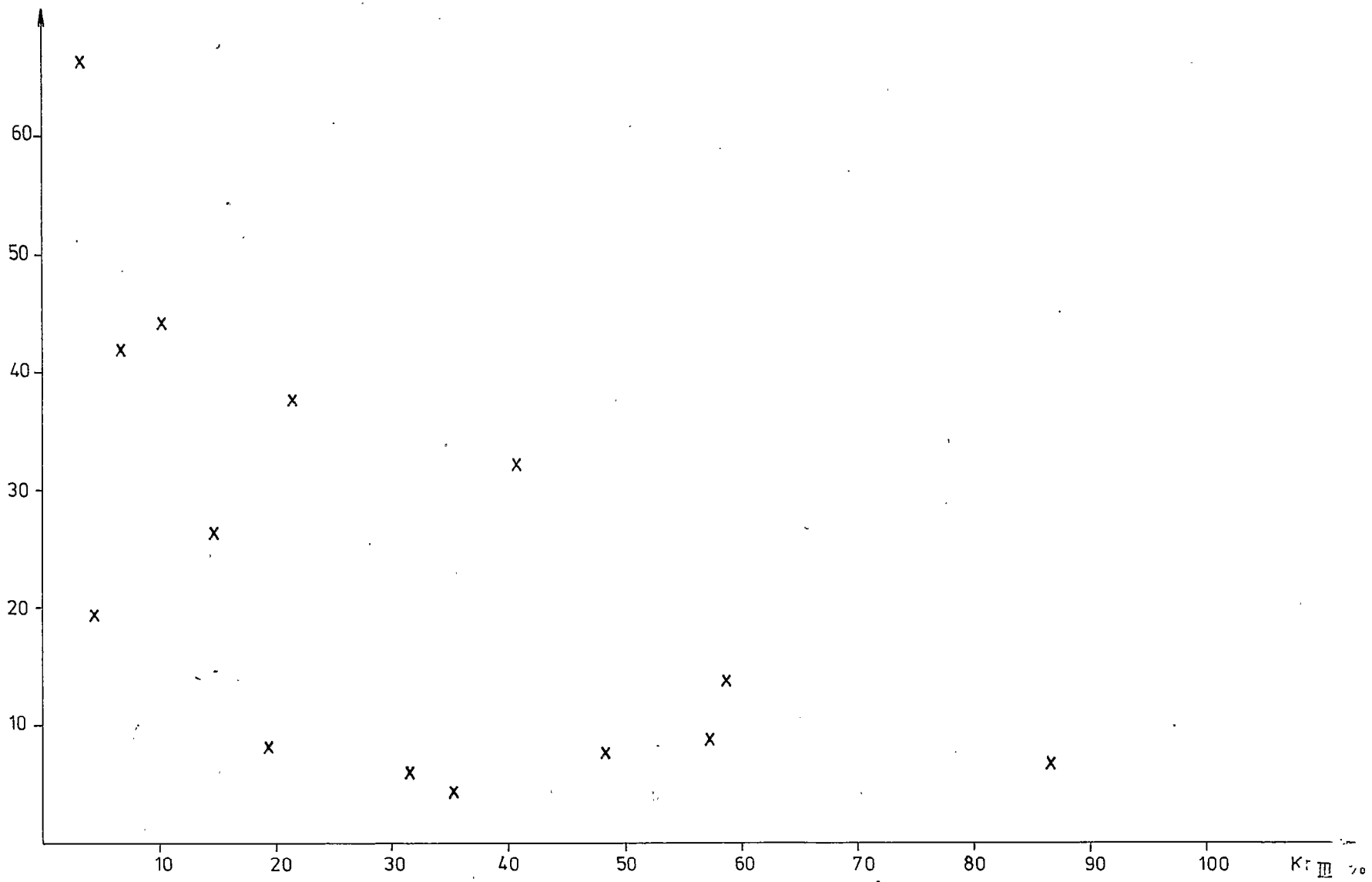


Figure 8

EVOLUTION DES MASSES DE GYPSE DISSOUT (●) SEDIMENTE (o) DU TOTAL (x)
EN FONCTION DU COEFFICIENT DU RUISSELLEMENT SUR LA PARCELLE III

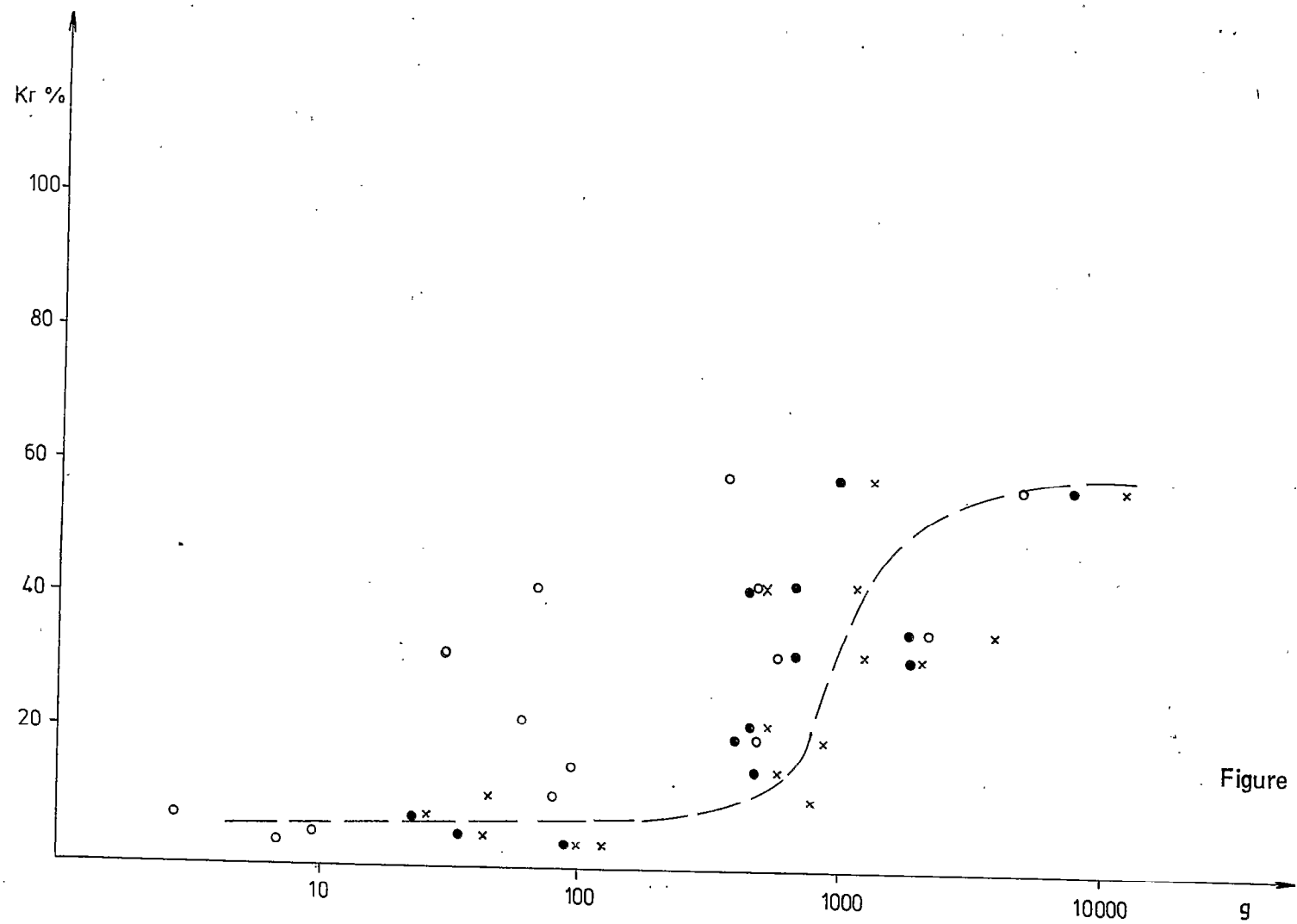


Figure 9

II-2-2 Gypse érodé total

On additionne ici les deux parts, "dissoute" et "sédimentée",.

Si l'on compare cette somme à la hauteur de pluie, les résultats sont très dispersés.

II-2-2-1 Charge totale

Lorsque le gypse total est rapporté au volume d'eau ruisselée, en g/l, on remarque que les valeurs s'échelonnent de 0,95 à 3,13 g/l (tableau IV), donc jusqu'à des valeurs supérieures à la solubilité normale du gypse, d'environ 2,3 g/l.

Deux faits pourraient expliquer des teneurs si élevées :

- soit que la dissolution se soit effectuée à partir d'une fraction de gypse partiellement déshydraté en semi-hydrate ($\text{SO}_4\text{Ca}, 0,5 \text{ H}_2\text{O}$), dont on sait qu'il est plus soluble que le gypse,
- soit que la solubilité du gypse lui-même se soit trouvée augmentée par la présence d'autres sels solubles dans les eaux de ruissellement.

La seconde hypothèse peut être aisément écartée puisque les concentrations maximales mesurées ne dépassent pas 1,86 g/l, de surcroît formées pour plus de 90 % de sulfate de calcium,

Quant à la première, deux séries d'observations au laboratoire et sur le terrain en infirment la possibilité :

- tout d'abord une série d'expériences a montré que, pour le type de gypse de ces sols à encroûtement de surface, une température supérieure à 70° est nécessaire pour faire apparaître le semi-hydrate (VIEILLEFON 1979),
- de plus plusieurs campagnes de mesure de la température "in situ", sur des profils de sols gypseux de la toposéquence qui nous intéresse en particulier, n'ont pas permis d'observer, même à la surface, de température supérieure à 60°, sans doute en raison du fort albedo de ces formations.

On est donc forcé d'admettre un transport sous forme solide, dont on a pu observer le dépôt sur les parcelles I et II, sous forme d'écailles arrachées aux croûtes gypseuses. Cette érosion peut atteindre 0,5 g/m²/mm pour 3,13 g/t de charge totale, cas de la pluie du 18.6.75, où il n'est pourtant tombé que 9,7 mm, mais avec un très fort ruissellement (42,2 %).

On relève aussi 2,89 g/l le 27.10.75 pour 43,5 mm, et 2,66 g/l le 5.5.75, pour 4,4 mm de pluie seulement. Il ne paraît donc pas y avoir de relation entre la charge totale et la hauteur de pluie.

Il est donc nécessaire de rapporter ces érosions à l'intensité des averses ou, à défaut, au coefficient de ruissellement (Kr).

Si l'on compare maintenant le gypse total transporté, rapporté au volume ruisselé, soit donc la charge totale, en g/l, au coefficient de ruissellement, on observe deux tendances (figure 10) :

- la plupart des valeurs s'alignent en montrant que quand Kr augmente jusqu'à un certain seuil, la teneur en gypse diminue, comme on l'a vu avant pour le gypse "dissout", ce qui peut s'expliquer par un temps de "dissolution" en surface plus bref relativement au volume en cause,
- au-delà de ce seuil, et notamment pour des valeurs de charge au voisinage de la saturation par rapport au gypse, on observe une nette tendance à l'augmentation en fonction de Kr, par suite de l'intervention de dépôts sous forme solide, l'intensité érosive croissant.

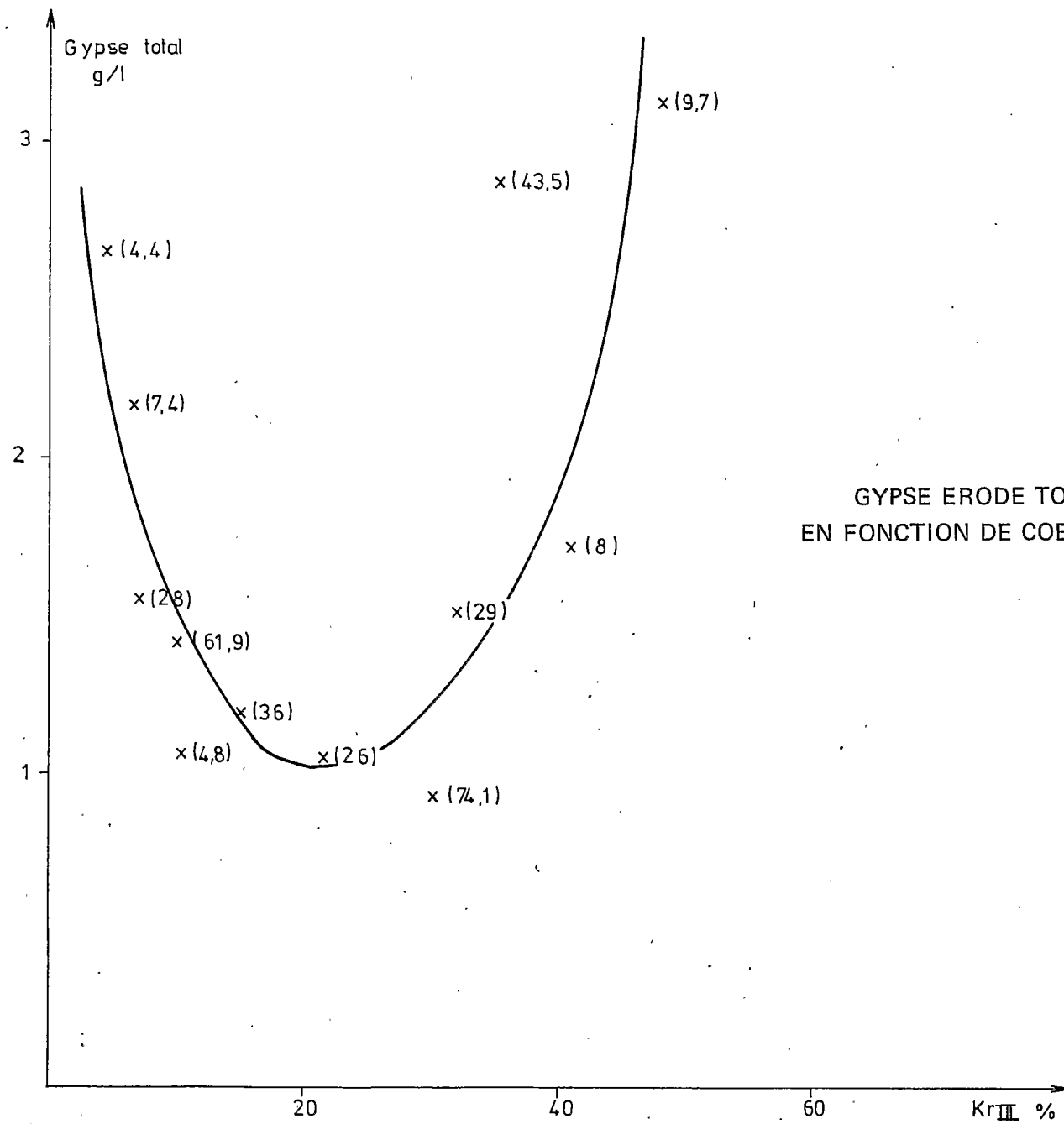
II-2-2-2 Erosion spécifique

Comparée au coefficient de ruissellement, cette donnée, bien qu'assez dispersée elle-aussi, montre que l'érosion atteint une limite à partir d'un certain taux de ruissellement (figure 11 regroupant les données des 3 parcelles).

Bien que l'on ne dispose que d'une dizaine de mesures d'intensité de la pluie, on remarque une bonne relation entre l'intensité maximale estimée à partir du hyétogramme de l'averse et l'érosion spécifique. Celle-ci ne se manifesterait qu'au-dessus de 20 mm/h (figure 12).

II-2-3 Conclusion

Il ne semble donc pas possible de déterminer avec précision l'importance des divers facteurs de l'érosion du gypse. On relève cependant parmi eux dont il convient de tenir compte :



GYPSE ERODE TOTAL SUR LA PARCELLE III
EN FONCTION DE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

Figure 10

EVOLUTION DE L'EROSION SPECIFIQUE MESUREE EN FONCTION DU COEFFICIENT DE
RUISSELLEMENT GLOBAL POUR LES TROIS PARCELLES

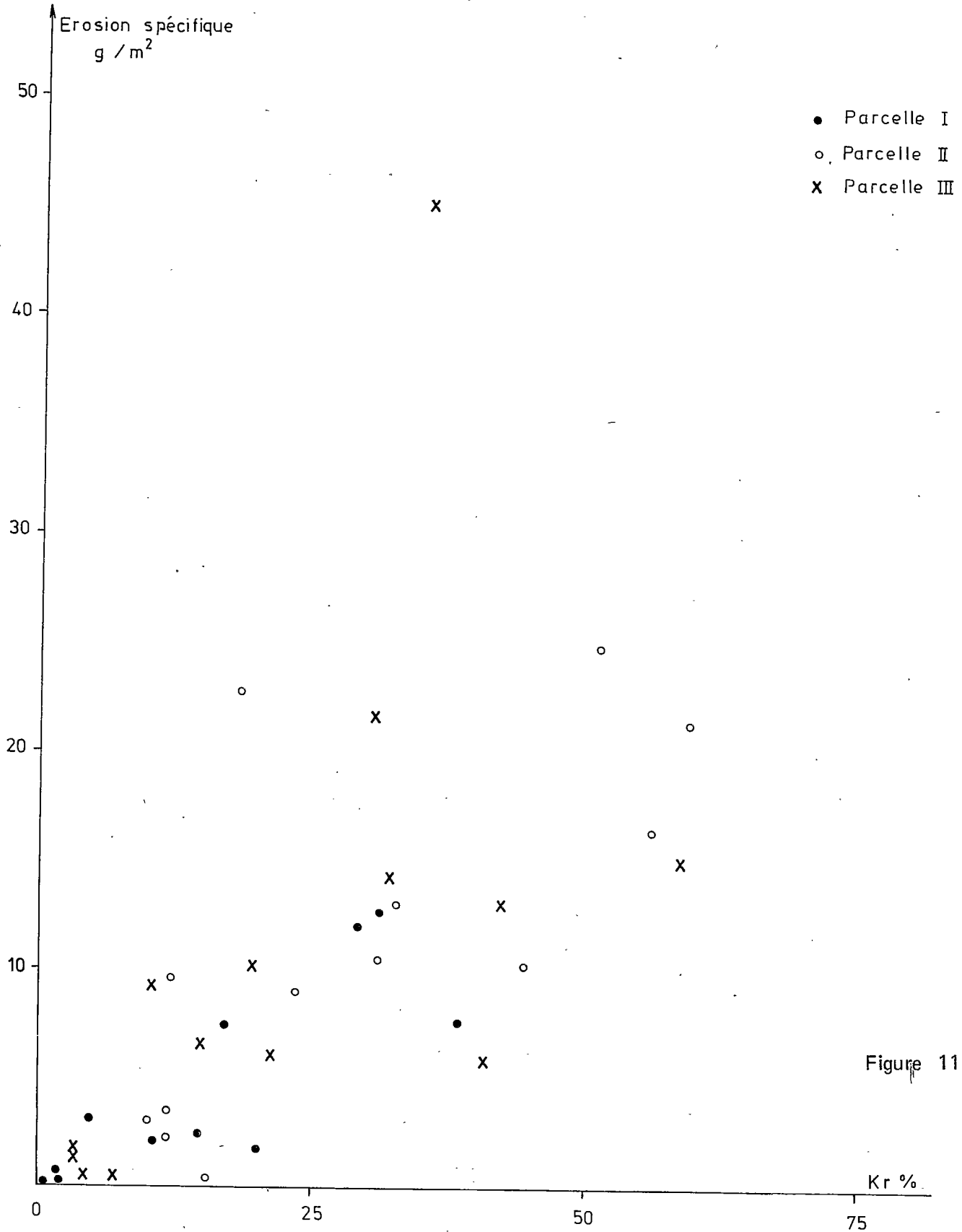


Figure 11

EVOLUTION DE L'EROSION SPECIFIQUE SUR LA PARCELLE III EN FONCTION DE
L'INTENSITE MAXIMALE DE LA PLUIE

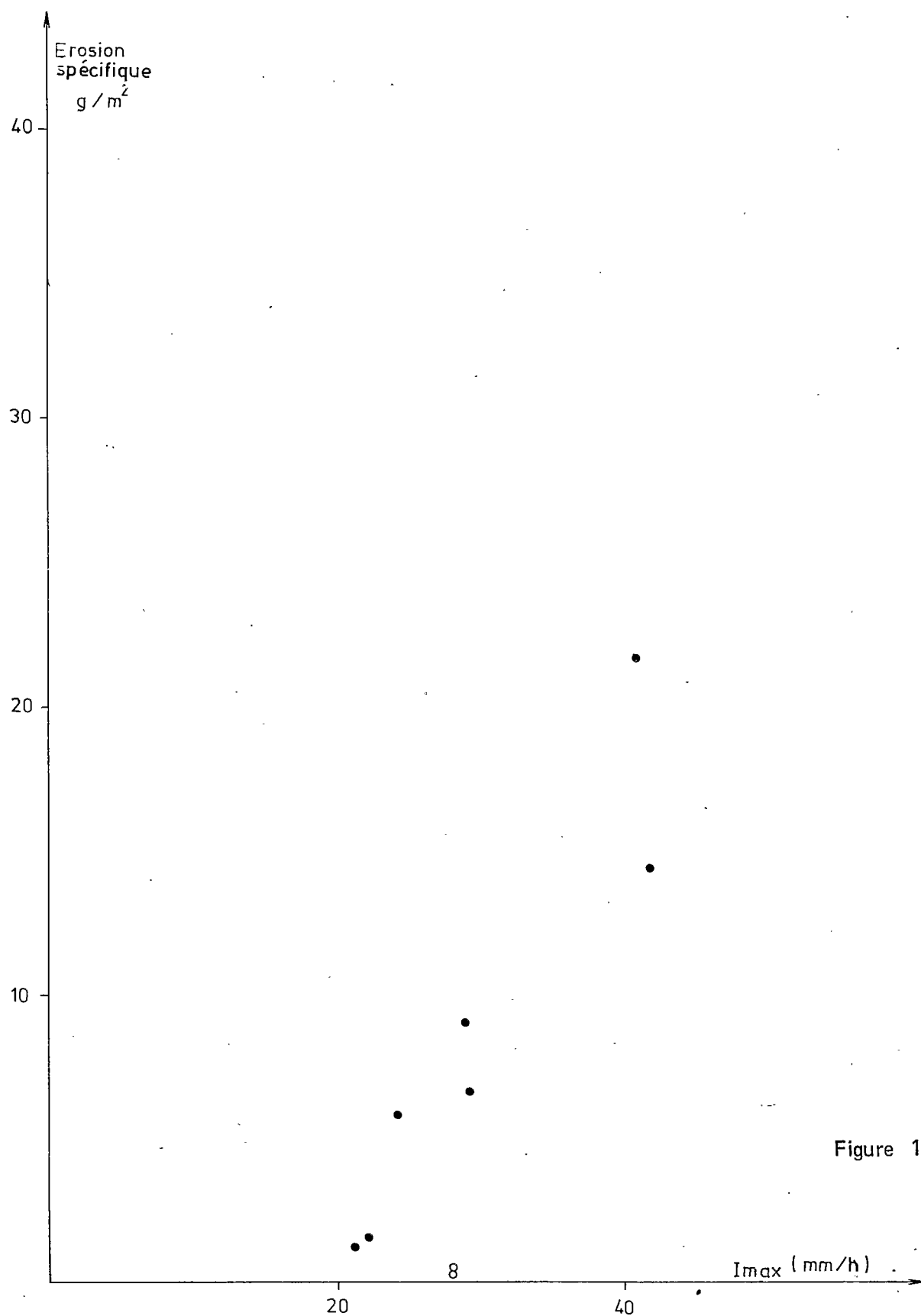


Figure 12

- la durée de la pluie et sa hauteur,
- la ou les intensités successives et le coefficient de ruissellement,
- les antécédents, car les plus fortes teneurs se placent en général après une période sèche, sauf de très importantes pluies comme celle du 12.12.73.

L'érosion du gypse est donc évidente et atteint des valeurs non négligeables. Ainsi le bilan sur 4 années sur la parcelle III (4-12-73 au 8.1.77) atteint 26.054 g pour 87 m², soit environ 75 g/m²/an, ce qui, traduit en épaisseur moyenne, et fonction de la densité des croûtes gypseuses, donne 0,075 mm/an. Si l'on compare ce chiffre à l'érosion totale mesurée sur la parcelle III, estimée à 12,6 m³/ha, soit environ 0,3 mm/an, on voit que la dissolution et l'ablation du gypse représente environ le quart de l'érosion totale, le reste étant formé de matériaux éoliens en transit.

II-3 Transport et absorption du gypse

Nous appelons absorption ce qui résulte du dépôt d'une partie des particules solides sur les sierozems des parcelles I et II, ou d'une infiltration plus ou moins profonde du gypse dissout.

Le gypse érodé sur la partie gypseuse de ces deux parcelles est ensuite transporté en grande partie à la surface battante des sierozems tronqués qui font suite à la couverture gypseuse, avant d'être piégé dans la fosse de la parcelle II, ou de s'arrêter en partie dans les sierozems ensablés plus perméables de la partie aval de la parcelle I, le surplus étant évacué dans la fosse de cette dernière.

En effet les propriétés physiques, et notamment la perméabilité, des sierozems, diffèrent nettement de celles des croûtes et encroûtements gypseux (BOURGES et al. 1973).

TABLEAU V

Vitesses d'infiltration des différents sols de la séquence (en 10⁻⁶ m/s)

	Sierozem	Sierozem tronqué	Croûte gypseuse
"Muntz"	27,1 à 35,4	17,4 à 27	6,2 à 9,1
"Porchet"	30 à 50	40 à 50	13 à 15

On peut s'attendre à ce que la pluie qui tombe sur les sierozems vienne diluer la lame qui ruisselle de l'amont et qu'une partie s'y infiltre.

Nous examinerons d'abord les quantités de gypse qui parviennent aux fosses des parcelles I et II, puis nous essaierons d'estimer la fraction initialement érodée qui est susceptible d'être piégée, en cours de transit, par les sierozems.

II-3-1 Etude de l'érosion et du transport sur la parcelle II

Rappelons que la répartition des sols compte 39 % de croûtes gypseuses à l'amont et 61 % de sierozems "tronqué" à l'aval.

Dans le sédiment, la teneur maximale en gypse ne dépasse pas 6 % (tableau VI).

L'examen des quantités apportées dans la cuve montre que celles-ci augmentent avec l'intensité du débit de sortie, ce qui peut s'expliquer par le fait que :

- d'une part l'absorption par infiltration ou dépôt sur le sierozem tronqué est ralentie,
- d'autre part la compétence du courant pour le transport de gypse sous forme solide augmente (figure 13).

Comme pour la parcelle III, on observe une relation assez bonne entre les intensités I_{\max} et I_{30} , avec les quantités de gypse total ou dissout ; la relation est grossièrement linéaire entre I et le gypse dissout, mais d'allure exponentielle pour le gypse total (figures 14 et 15). Mais dans ce cas le gypse dissout augmente avec l'intensité, alors que c'est l'inverse sur la parcelle III. Sur la parcelle II, la fonction "transport" l'emporte sur la fonction "dissolution".

II-3-1-1 Erosion spécifique

Si l'on compare les quantités totales de gypse apportées aux cuves des parcelles II et III, rapportées à la surface en gypse de chaque parcelle, on remarque que dans plus de la moitié des cas, l'érosion spécifique sur la partie gypseuse de la parcelle II est supérieure à celle de la parcelle III, dans un rapport qui varie de 1,12 à 2,20 ! Et ce, même en appliquant une correction pour la pluie, qui est très souvent un peu plus forte sur la parcelle II.

VARIATION DE LA CHARGE TOTALE EN GYPSE EN FONCTION DU DEBIT
DE LA CRUE SUR LA PARCELLE II

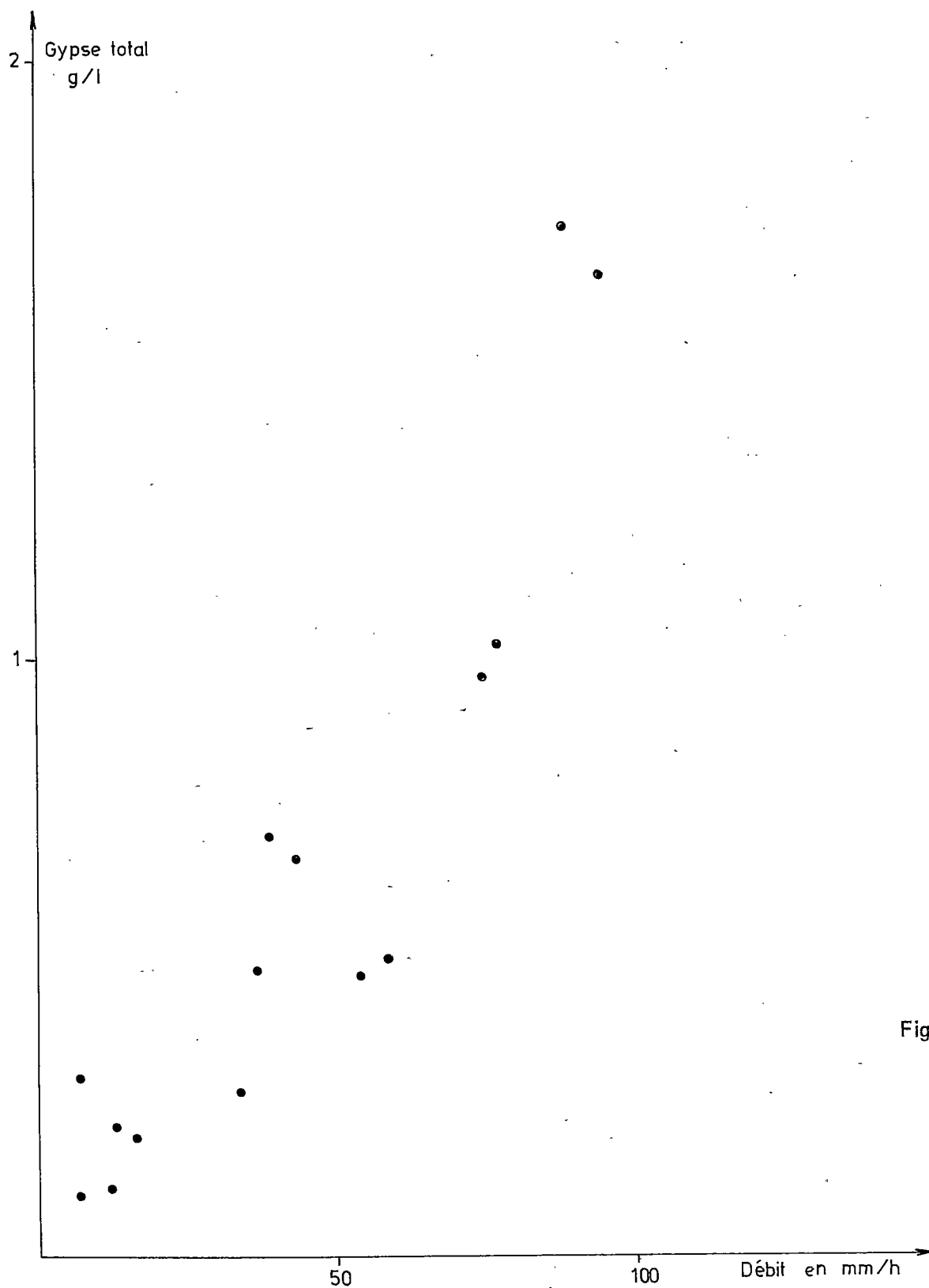


Figure 13

↑ 1310
●

↑ 1310
X

RELATION GYPSE DISSOUT – INTENSITE SUR LA PARCELLE II

X I_{15'}
● I_{30'}

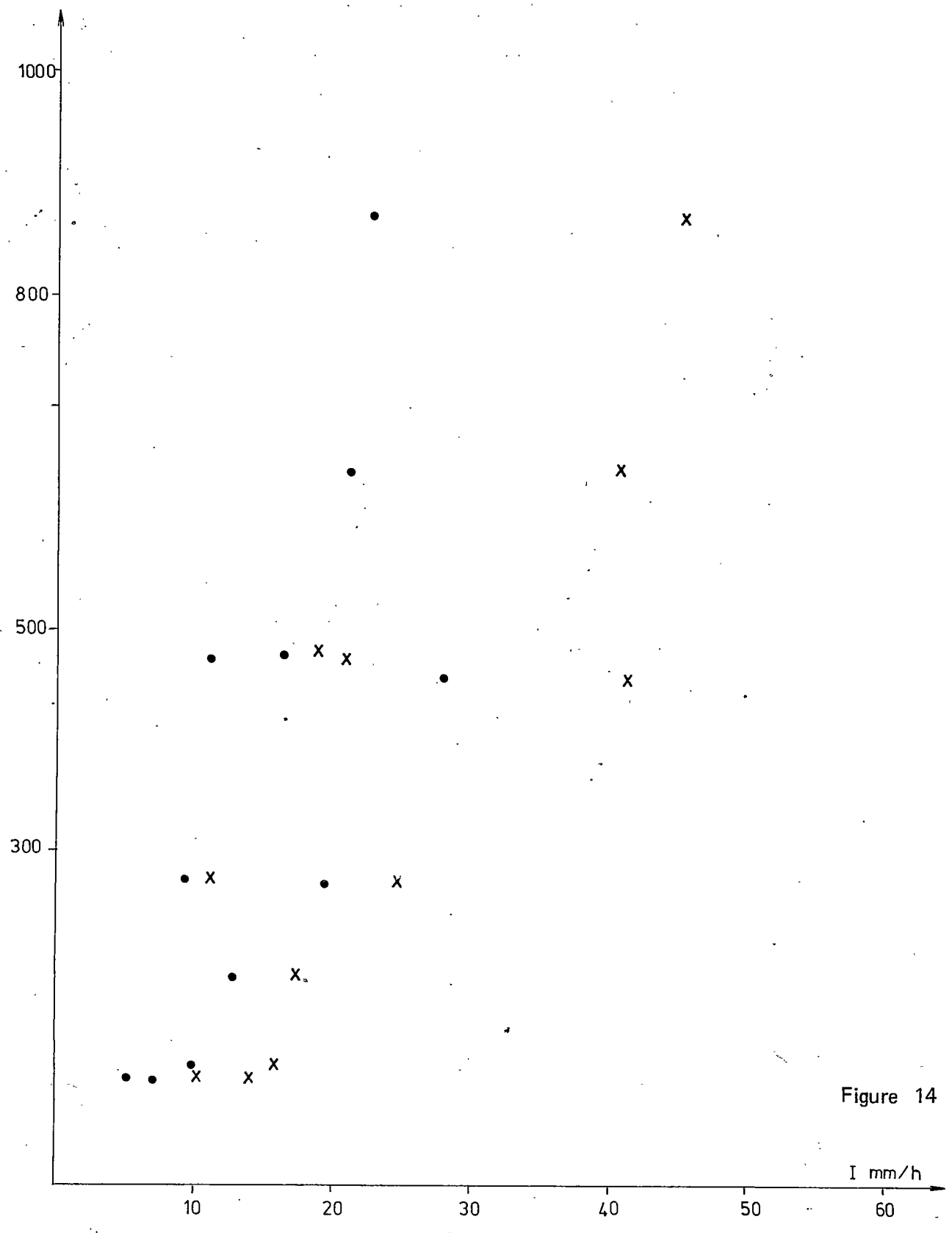


Figure 14

RELATION GYPSE TOTAL - INTENSITE SUR LA PARCELLE II

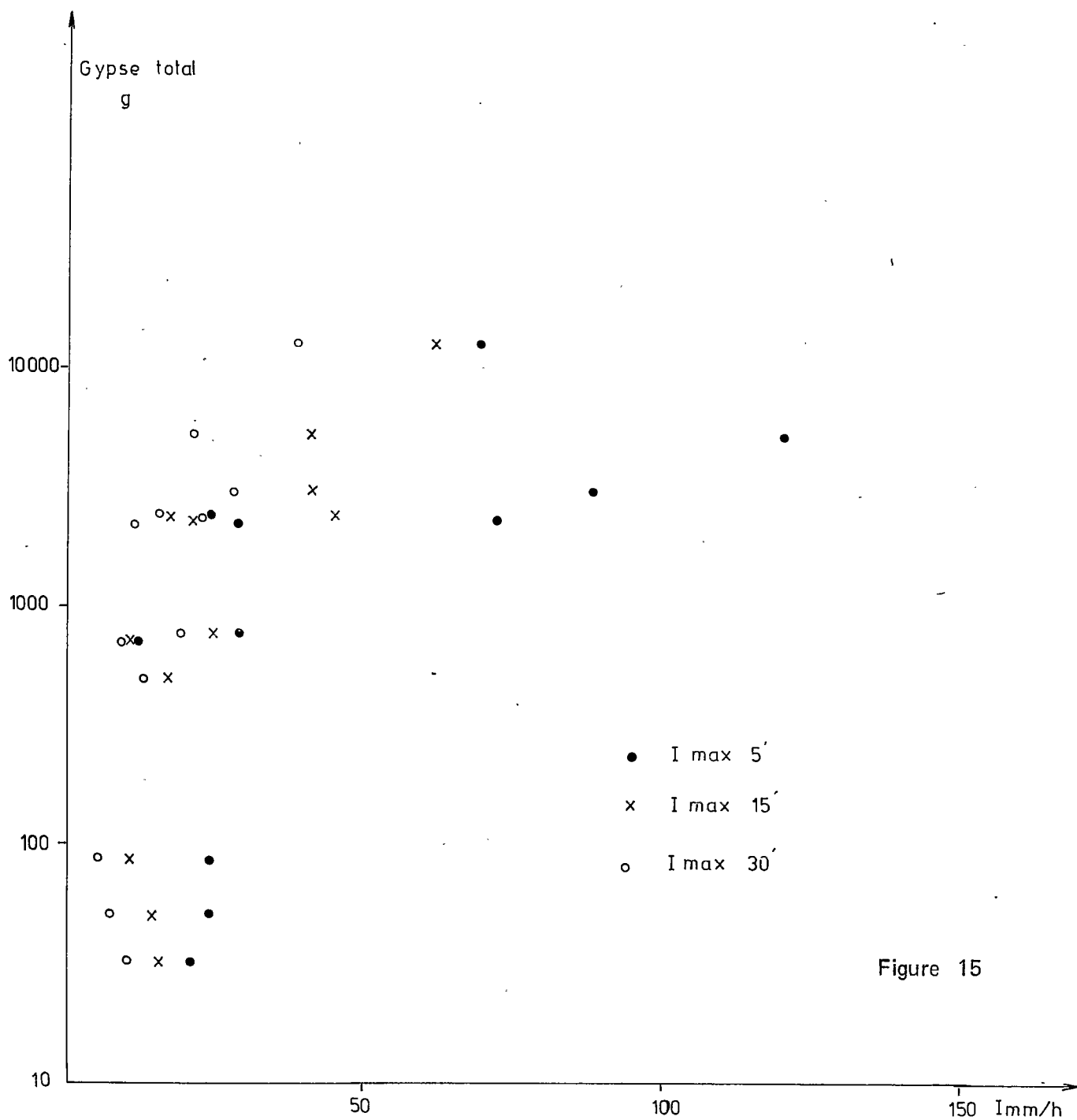


Figure 15

TABLEAU VI

Caractéristiques des pluies et des transports de gypse sur la parcelle II

Date	Hpmm	V _l	Kr %	Gypse "dissout"		Gypse "sédimenté"		Gypse total			Débit max. Q mm/h	Erosion Spécifique Référence PIII	% Absorpt.
				mg/l	g	%	g	g	g/l	g/m ²			
11.12.73	41,4	2880	11,8	272	783,6	0,6	10,9	794,5	0,28	3,44	33,5	7,39	53
12.12.73	115,8	35050	51,4	927	32498,3	4,5	10298,7	42797,0	1,22	185,27	150,0	140,14	-
21.09.74	22,4	3127	23,6	648	2026,3	1,0	37,0	2063,3	0,66	8,93	43,0	12,16	27
10.10.74	9,2	2419	44,5	870	2104,5	2,0	254,0	2358,5	0,97	10,21	74,4	6,59	-
15.10.74	11,2	3717	56,2	666	2475,1	4,0	1304,0	3779,1	1,02	16,36	76,9	21,05	22
10.02.75	5,1	295	9,8	109	32,2	tr	-	32,2	0,11	0,14	-	0,56	25
22.03.75	36,5	2537	11,8	191	485,8	1,0	19,5	505,3	0,20	2,19	16,0	1,28	-
5.05.75	4,5	413	15,5	197	81,4	1,0	5,5	86,9	0,21	0,38	13,0	0,53	19
6.05.75	3,5	472	22,8	98	46,5	2,0	5,0	51,5	0,11	0,22	12,0	0,38	42
18.06.75	8,9	3127	59,5	1394	4360,3	2,0	770	5130,3	1,64	22,21	94,5	11,81	-
25.09.75	15,3	4602	50,9	1203	5535,7	1,0	185	5720,7	1,24	24,76	-	18,13	-
27.10.75	48,5	7611	26,6	1310	9972,7	5,0	3124,9	13097,6	1,72	56,70	88,5	49,99	-
9.01.76	70,0	7493	18,1	643	4815	6,0	449,9	5264,9	0,70	22,79	39,0	20,42	-
14.01.76	39,2	2360	10,2	274	646,4	1,0	69,9	716,3	0,30	3,10	6,7	1,41	-
24 28.02.76	66,2	4720	12,1	474	2238,7	tr	-	2238,7	0,47	9,69	53,7	9,67	-
10.03.76	28,3	5074	30,4	481	2443,1	tr	-	2443,1	0,48	10,58	36,6	6,38	-
8.01.77	31,5	6018	32,4	460	2768,3	1,0	219	2987,3	0,50	12,93	58,0	15,45	16

Cela montre deux choses :

- la surface du sierozem tronqué, glacée par une croûte de battance (BOURGES et al. 1973) favorise le ruissellement au moins autant, sinon plus que la croûte gypseuse
- la plus grande longueur de sol gypseux de la parcelle II doit permettre, pour une même vitesse, un temps de contact plus long des eaux avec la surface gypseuse, d'où une augmentation de la quantité de gypse enlevée. C'est lorsque Kr dépasse 25 % que l'érosion spécifique est plus forte sur la parcelle II.

L'analyse du rapport entre l'érosion spécifique théorique sur la parcelle II, assimilée à celle de la parcelle III, mais corrigée par le rapport des hauteurs de pluie ($\frac{H_p \text{ II}}{H_p \text{ III}}$), et l'érosion calculée à partir du gypse recueilli dans la fosse de la parcelle II, rapportée à la surface en croûte gypseuse de la même parcelle, montre que sa valeur moyenne s'établit à 1,27, qui est une valeur très proche du rapport des longueurs des parties gypseuses des deux parcelles (1,23). On est donc obligé d'admettre que la longueur des parcelles joue un rôle sur l'érosion globale, non point tant sans doute sur la fraction dissoute que sur la fraction solide.

II-3-1-2 Influence du ruissellement sur le sierozem tronqué

Un coefficient de ruissellement global a été calculé pour chaque parcelle (tableau II, IV, V). Les rapports de campagne de 1972-73 et 73-74 donnent le détail des Kr calculés pour chaque épisode unitaire au sein des averses observées (BOURGES et al. 1973-1975). On constate que le Kr global, calculé par le rapport du volume ruisselé, pondéré par la surface, à la hauteur de pluie, varie fortement, mais beaucoup moins que les Kr unitaires. Cependant, les eaux et les sédiments n'ayant été recueillis qu'à la fin de chaque période pluvieuse, nous nous contenterons du Kr global, tout en admettant qu'il n'est qu'une représentation atténuée et schématique de l'intensité du phénomène de ruissellement.

Si l'on fait l'hypothèse que, dans des conditions pluviométriques voisines (H_p et I), les caractéristiques du ruissellement sont identiques sur les mêmes sols des trois parcelles, soit sur les parties gypseuses des parcelles I et II et sur la parcelle III, ainsi que sur le sierozem tronqué des parcelles I et II, on peut estimer les coefficients de ruissellement élémentaires des sierozems tronqués et ensablés ou modal (cf I-2) compte tenu de la séquence cumulative précédemment décrite.

II-3-1-2-1 Calcul de coefficient de ruissellement élémentaire du sierozem tronqué

Pour cela on pourrait penser qu'il suffit de considérer séparément les deux parties gypseuse et non gypseuse de la parcelle II, par exemple, et de pondérer les Kr par les surfaces respectives, par une formule de la forme :

$$Kr_{II} \times S_{II} = Kr_{GII} \times S_{GII} + Kr_{STII} \times S_{STII}$$

Les indices II, GII et STII représentant respectivement, l'ensemble et les parties gypseuse et non gypseuse de la parcelle II. D'où l'on pourrait tirer Kr_{STII} du sierozem tronqué, en prenant $Kr_{GII} = Kr_{III}$.

Or, la disposition de la parcelle fait que ce qui a ruisselé au sortir de la partie gypseuse vient s'ajouter à la pluie qui tombe sur le sierozem tronqué (figure 16). Pour en tenir compte, il suffit de calculer les volumes d'eau qui parviennent sur le sierozem :

$$(H_p \text{ mm} \times Kr_{III}) S_{GII} + H_p \times S_{STII}$$

d'où l'on tire :

$$Kr_{STII} = \frac{V_1}{H_p(Kr_{III} \times S_{GII} + S_{STII})} = \frac{V}{H_p(231 Kr + 359)}$$

V étant le volume recueilli dans la fosse de la parcelle II.

II-3-1-2-2 Analyse des résultats

Les valeurs ainsi calculées pour le sierozem tronqué (tableau VI) sont nettement supérieures au Kr global de la parcelle, de 16 à 77 % contre 10,2 à 59,5 %. Elles sont également en moyenne supérieures au Kr de la partie gypseuse, pris par référence à la parcelle III.

Si l'on compare maintenant, comme pour la parcelle III, l'érosion spécifique au Kr, on obtient une meilleure relation avec celui du sierozem (Kr_{STII}) qu'avec le Kr global de la parcelle (figure 17 à comparer à la figure 11).

CIRCULATION DES EAUX SUR LA PARCELLE I

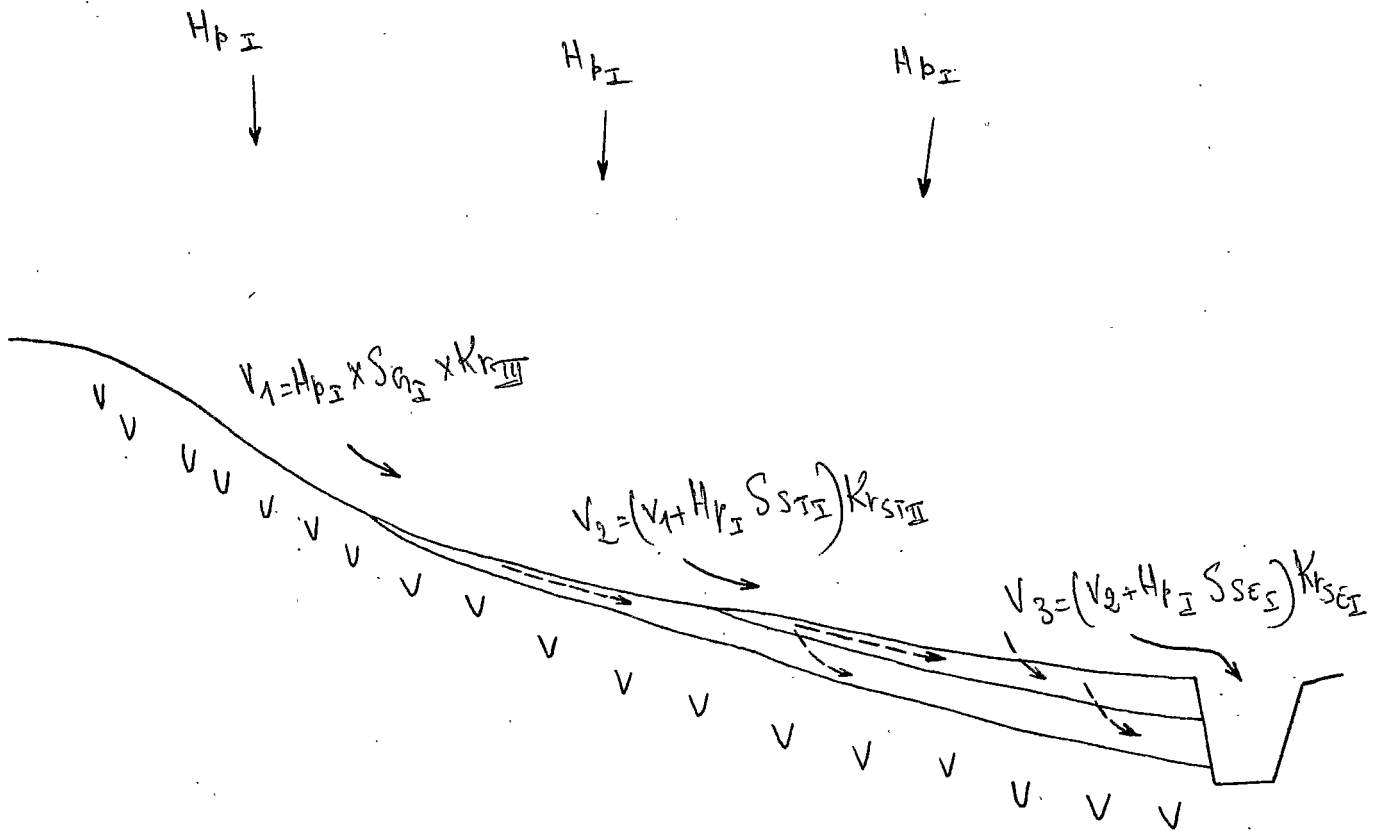


Figure 16

ÉROSION MESURÉE ET CALCULÉE PAR RAPPORT AUX COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT ELEMENTAIRES

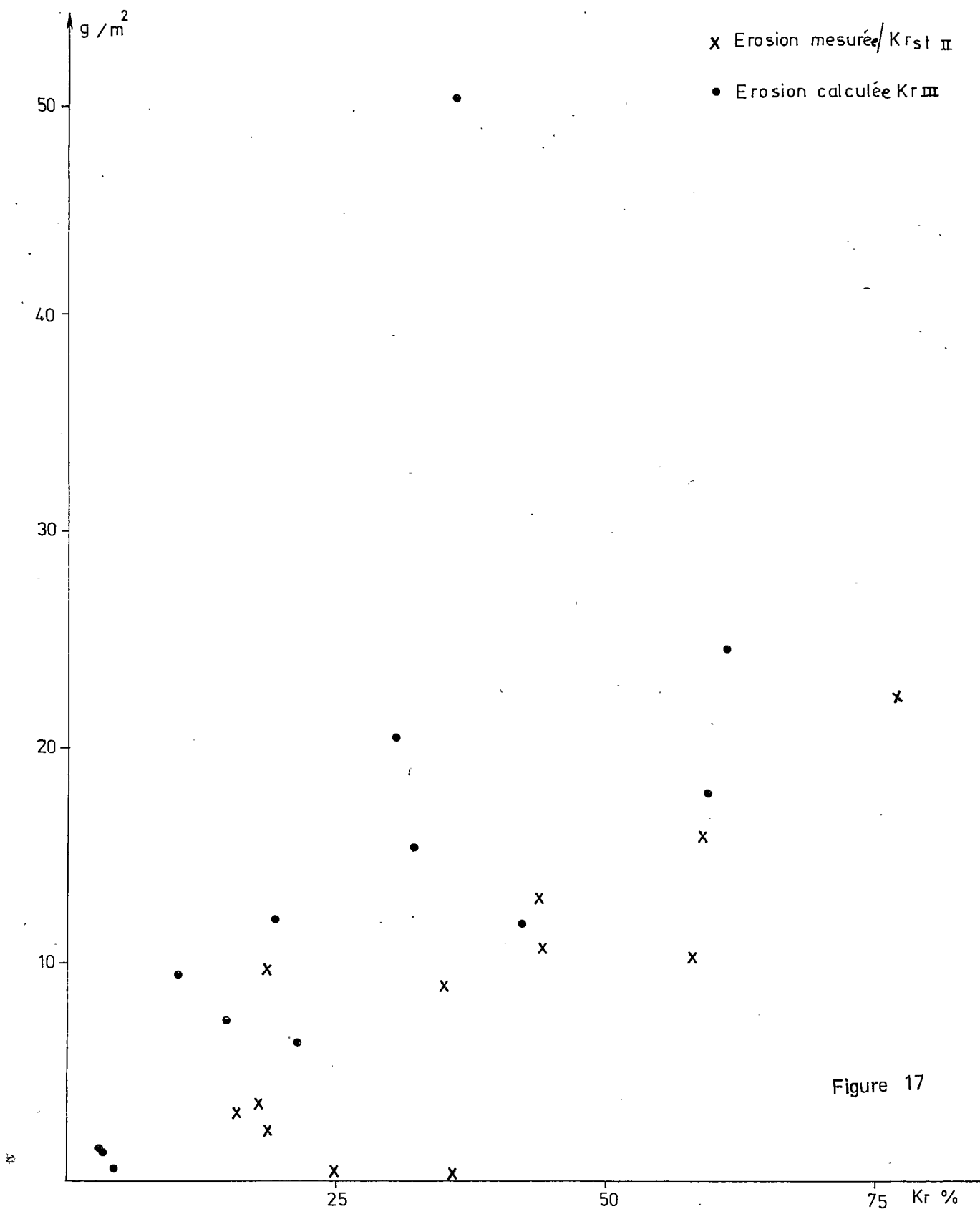


TABLEAU VII

Coefficients de ruissellement mesuré sur les parcelles
et calculés pour différents sols

	$Kr_{III} = Kr_6$	Kr_{STII}	Kr_{II}	Kr_{SEI}	Kr_I
4.12.73	14,9	18	11,8	7	3,5
12.12.73	57,5	62	51,4	6,5	(60)
21.09.74	19,5	35	23,6	21	11
10.10.74	41,0	58	44,5	33	20
15.10.74	86,5	59	56,2	52	38
22.03.75	3,5	19	11,8	5	22
5.05.75	4,5	25	15,5	0	0
6.05.75	7,1	36	22,8	0	0
18.06.75	42,2	77	59,5	44	31
25.09.75	58,7	61	50,9	42	29
27.10.75	35,6	36	26,6	35	19
9.01.76	30,5	25	18,1	20	10
14.01.76	3,3	16	10,2	9	4
5-28.02.76	10,2	19	12,1	16	12
10.03.76	21,5	44	30,4	25	14
8.01.77	32	44	32,4	31	17
MOYENNE	29,3	39,6	29,9	25,3	16,9

La figure 17 montre que l'érosion spécifique théorique sur la partie gypseuse de la parcelle II tend à se stabiliser quand le K_r atteint 50 %, tandis que l'érosion spécifique mesurée augmente avec le coefficient de ruissellement du sierozem tronqué ($K_{r_{STII}}$).

Il existe cependant dans certains cas une absorption du gypse sur ce sierozem qui atteint un maximum de 53 % le 4.12.73, avec un $K_{r_{ST}}$ de 18 %, mais elle reste, en général faible sur le sierozem tronqué (tableau VI)..

Le rapport gypse "dissouté / gypse "sédimenté" est en général nettement supérieur à ce qui est mesuré sur la parcelle III, et la charge totale ne dépasse pas 1,72 g/l, mais il est possible qu'au cours du transit une partie du gypse érodé sous forme solide se soit dissout. On observe une bonne relation entre cette teneur et le K_r du sierozem tronqué (figure 18), ce qui caractérise l'aptitude au ruissellement de ce sol.

II-3-2 Etude de l'absorption sur la parcelle I

II-3-2-1 Mise en évidence du phénomène

L'examen des poids de sédiments recueillis montre que l'érosion hydrique globale est beaucoup moins active que sur les autres parcelles. Par comparaison, on montre en effet (FERSI, ZANTE, 1980) qu'au contraire, la parcelle I (plus exactement sa partie aval) reçoit globalement un dépôt qui représente plus des 3/4 de ce qui est érodé sur les croûtes gypseuses (980 contre 1227 T/km²).

Du gypse parvient cependant jusqu'à la fosse, dans les eaux qui en contiennent jusqu'à 1 g/l, et les sédiments jusqu'à 5 % (tableau VIII). La charge totale ne dépasse pas 1,2 g/l. Cependant de fortes crues, comme celle du 12.12.73, peuvent en exporter des quantités notables. La crue ci-dessus représente en effet 62 % de l'ensemble des 3 années, contre 50 % pour la parcelle II et 46 % pour la parcelle III. On constate sans doute là l'influence des fortes crues sur la parcelle I qui permettent l'arrivée jusqu'à la fosse d'une part relative plus importante des dépôts ayant eu lieu à l'amont, le seuil d'absorption de la partie aval étant largement dépassé.

TRANSPORT DU GYPSE SUR LE SIÉROZEM TRONQUE.

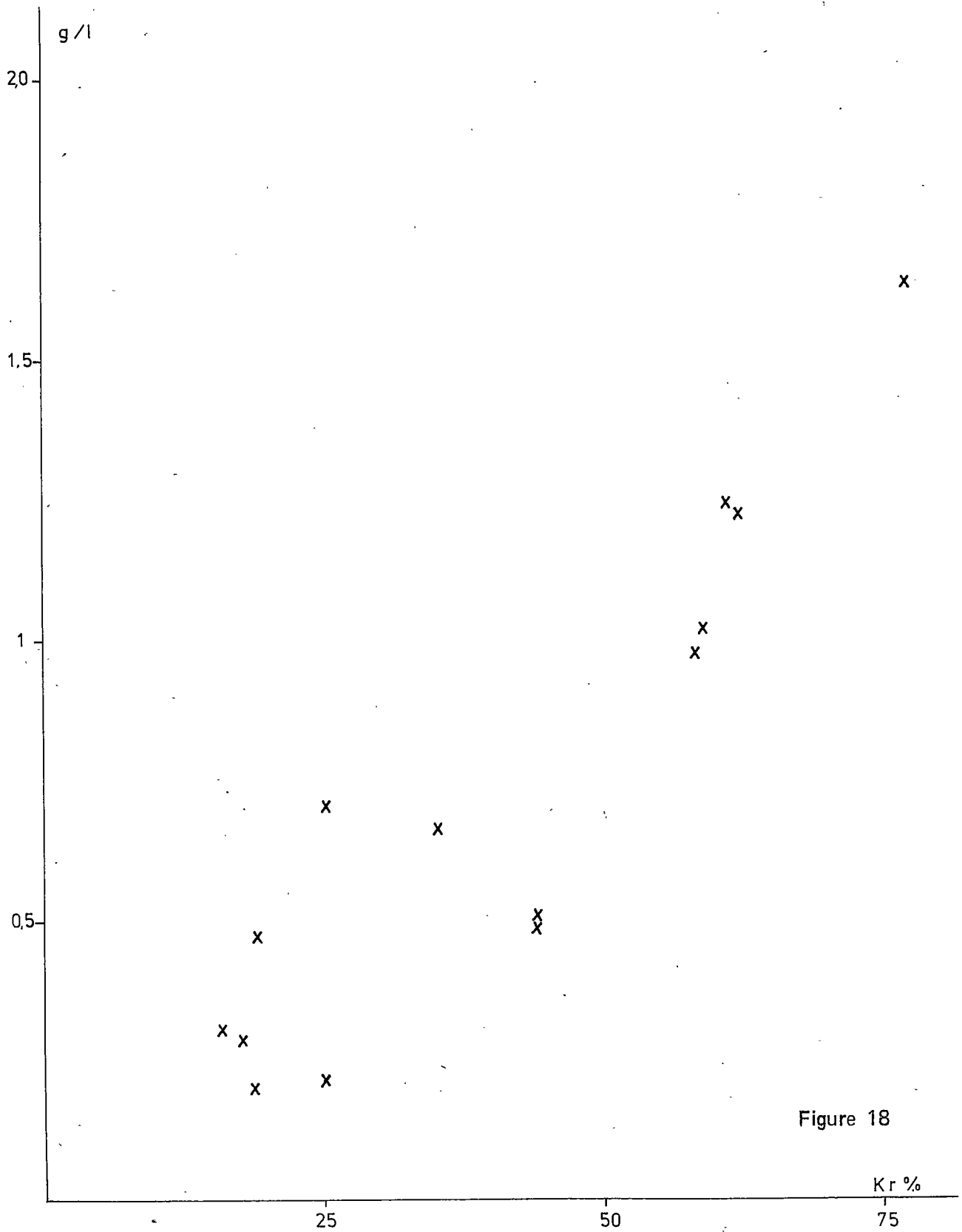


Figure 18

TABLEAU VII

Caractéristiques des pluies et des transports de gypse sur la parcelle I

Dates	Hp _{mm}	V _l	Kv %	Gypse dissout		Gypse sédimenté		Gypse total			Erosion Spécifique Référence PIII	% Absorption	
				mg/l	g	%	g	g	g/l	g/m ²		Référence PIII	Référence PII
4.12.73	41,3	4745	3,5	206	977	0,5	120	1097	0,23	0,88	7,37	88	61,5
12.12.73	129,1	(210240)	(60)	773	162574	1,9	5605	168179	0,80	135,63	156,24	13	27
21.09.74	22,4	8760	11	267	2336	tr	-	2336	0,27	1,88	12,16	85	79,5
10.10.74	9,2	6935	20	285	1974	1,0	214	2188	0,32	1,76	6,59	73	83
15.10.74	10,8	14965	38	596	8920	1,0	454	9374	0,63	7,56	20,3	63	52
10-11.02.75	4,9	365	1,5	95	34	tr	-	34	0,09	0,03	0,54	95,5	83
22.03.75	36,0	2920	2,2	34	99	2,0	55	154	0,05	0,12	1,26	90	95
5.05.75	4,5	tr	-	138	-	4,0	88	88	-	0,07	0,53	87	66,5
6.05.75	3,4	tr	-	104	-	tr	-	-	-	0	0,36	100	80
18.06.75	11,5	13140	31	999	13124	5,0	2525	15649	1,19	12,62	15,26	17	43
25.09.75	15,2	16000	29	859	13747	1,0	1178	14925	0,93	12,04	18,01	33	51
27.10.75	47,8	32485	19	872	28318	tr	-	28318	0,88	22,93	49,27	53	60
9.01.76	75,1	27375	10	344	9408	1,0	1123	10531	0,38	8,49	21,91	61	63
14.01.76	42,0	5840	4	41	240	tr	-	240	0,05	0,24	1,51	84	92
25-28.02.76	65,0	17155	4,7	218	3746	tr	-	3746	0,22	3,07	9,49	68	61,5
10.03.76	28,8	14235	14	213	3032	tr	-	3032	0,21	2,46	6,38	61	77
8.01.77	30,9	19345	17	460	8899	1,0	177	9076	0,47	7,32	15,15	52	39

L'érosion spécifique est en général plus faible mais peut s'approcher des valeurs mesurées sur la parcelle III pour les crues les plus fortes (tableau VII)

On observe donc en général une forte absorption sur la parcelle I, par ^{en surface} dépôt du sierozem ensablé ou par infiltration en profondeur, du gypse dissout ou arraché aux formations gypseuses.

II-3-2-2 Calcul de l'absorption

Nous définissons l'absorption par le rapport de ce qui est absorbé sur le sierozem modal ou ensablé du tiers aval de la parcelle à ce qui est théoriquement érodé sur le tiers amont gypseux, la zone centrale à sierozem tronqué étant considérée comme une zone de transit d'absorption généralement minime.

Pour chaque épisode, nous calculons ce qui est absorbé par la différence entre ce qui est théoriquement érodé, sous forme dissoute ou solide, par référence à ce qui se passe sur la parcelle III, ou sur la parcelle II lorsque celle-ci s'érode proportionnellement plus (cf. II-3-1-1), et ce qui est mesuré dans la fosse de la parcelle. S'il y a lieu, l'absorption éventuelle constatée sur la parcelle II est également soustraite, à raison de la moitié, en raison du rapport des longueurs des différents sols :

$$\left(\frac{L_G}{L_{ST}}\right)_{II} = 2\left(\frac{L_G}{L_{ST}}\right)_I$$

L_G = longueur de la partie gypseuse
 L_{ST} = " " " " sierozem tronqué

L'érosion spécifique calculée pour la parcelle I (ESC_I) s'obtient donc en multipliant l'érosion spécifique mesurée sur la parcelle III (ESM_{III}) par le rapport des hauteurs de pluies (Hp_I / Hp_{III}) ; notons que ce même calcul s'applique à partir de l'érosion spécifique de la parcelle II (ESM_{II}) lorsque celle-ci s'érode plus que la parcelle III :

$$ESC_I \text{ (g/m}^2\text{)} = ESM_{III} \times \frac{Hp_I}{Hp_{III}} \quad \text{ou} \quad ESM_{II} \times \frac{Hp_I}{Hp_{II}}$$

En appelant ESM_I l'érosion spécifique mesurée sur la parcelle I, l'absorption s'écrit :

$$A \% = \frac{ESC_I - ESM_I}{ESC_I} \times 100$$

Elle varie, pour les 17 pluies étudiées, de 13 à 100 % quand le coefficient de ruissellement global de l'ensemble de la parcelle passe de 60 % à 0. Cependant cette relation assez lâche peut être améliorée.

En effet on note qu'il peut se produire une certaine absorption du gypse sur le sierozem tronqué situé entre la croûte gypseuse et le sierozem ensablé, d'où (cf ci-dessus) :

$$A_{STI} = 1/2 A_{STII}$$

D'autre part, il est plus juste de comparer cette absorption, non au Kr global de la parcelle, mais plutôt au Kr élémentaire du sierozem ensablé dans lequel cette absorption se produit.

II-3-2-3 Calcul du Kr élémentaire du sierozem ensablé (Tableau VII)

Partant des coefficients de ruissellement mesurés pour la croûte gypseuse de la parcelle III et calculés pour le sierozem tronqué de la parcelle II, on calcule qu'il parvient sur le sierozem modal ou ensablé de la parcelle I (figure 16)

- la lame ruisselée sur le sierozem tronqué
- la pluie tombant directement sur le sierozem modal

ce qui, en volume, donne la somme :

$$H_p(SG_{II} \times Kr_{III} + S_{TI}) Kr_{STII} + S_{SEI} \times H_p$$

SG_I = surface gypseuse de la parcelle

S_{STI} = surface en sierozem tronqué

S_{SEI} = surface en sierozem ensablé

soit, pour le coefficient de ruissellement élémentaire du sierozem ensablé :

$$Kr_{SEI} = \frac{V_I}{H_{pI} (1460 + (950 + 1240 Kr_{III}) Kr_{STII})}$$

II-3-2-4 Absorption en fonction du ruissellement sur le sierozem ensablé

Cette absorption du gypse (A_I %) est calculée de la manière suivante :

$$A_I \% = \frac{(ESC_I - 1/2 A_{STII}) - ESM_I}{ESC_I} \times 100$$

A_{ST2} = Absorption sur le sierozem tronqué de la parcelle II en %

avec $A_{ST2} = \frac{ESC_2 - ESM_2}{ESC_2}$

Il existe une relation entre ce pourcentage d'absorption du gypse, érodé sur la partie gypseuse de la parcelle, et le coefficient de ruissellement global de la parcelle :

$$A_I \% = 89 - 1,18 Kr_I \quad (r = 0,885)$$

Cette relation est améliorée si on utilise le coefficient de ruissellement élémentaire du sierozem ensablé (Kr_{SEI}) précédemment calculé (figure 19).

On obtient alors :

$$A_I \% = 96 - 1,05 Kr_{SEI} \quad (r = 0,921)$$

Si on définit un coefficient d'infiltration de l'eau par K_i = 100 - Kr, on peut alors exprimer l'absorption du gypse en fonction de l'eau infiltrée :

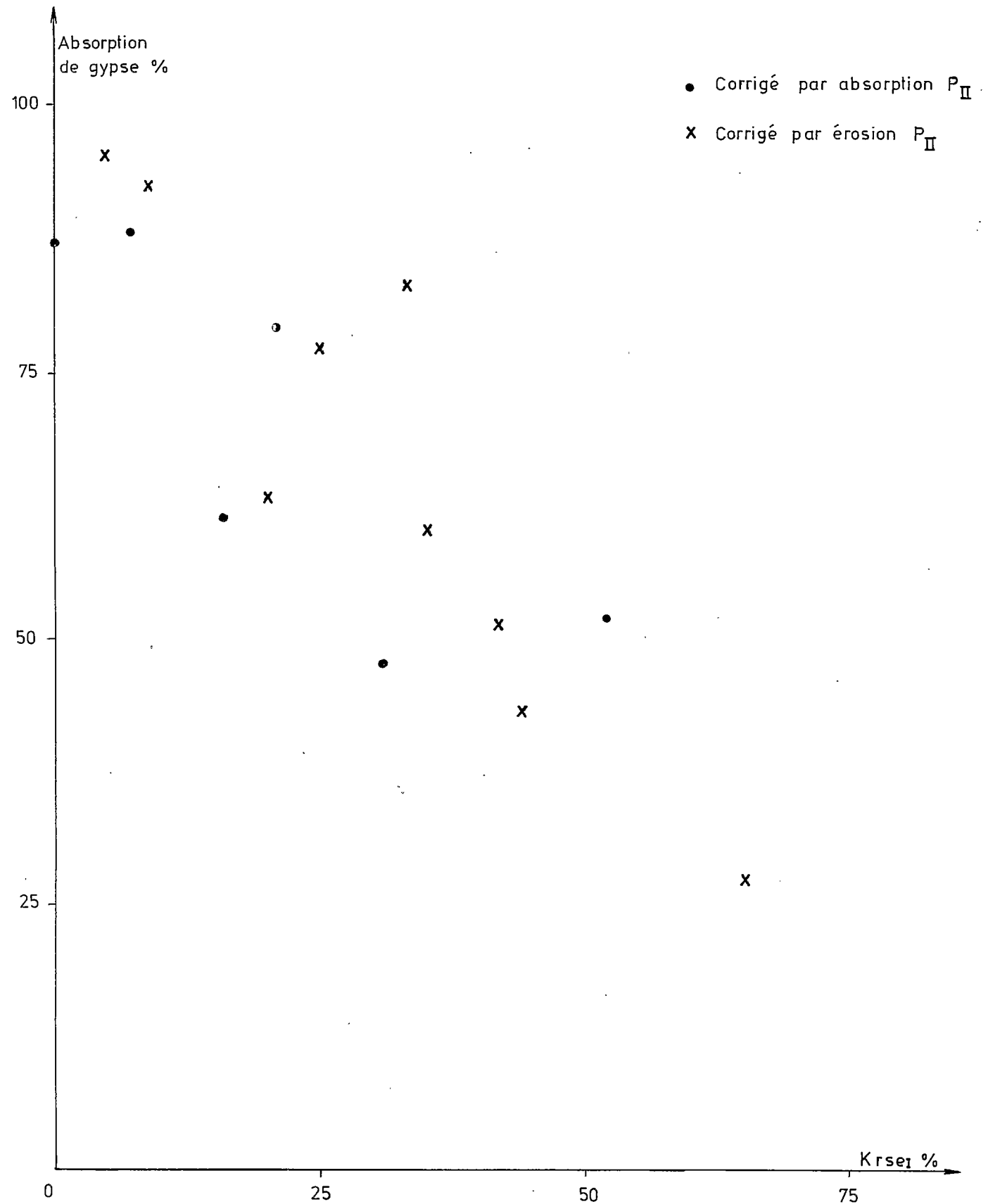
$$A_I \% = 1,05 K_i - 9$$

Ce qui montre bien la dépendance du dépôt et de l'entraînement en profondeur du gypse, de l'infiltration de l'eau qui en est le vecteur.

II-4 Bilan interannuel de l'absorption du gypse sur la parcelle I

Si l'on calcule l'érosion spécifique par référence à la parcelle III en corrigeant par le rapport des hauteurs de pluies ($ESC_I = ESM_{III} \times \frac{Hp_I}{Hp_{III}}$) on obtient une érosion interannuelle de 423,9 kg de gypse; ce qui, pour 269 kg évacués dans la fosse représente une exportation moyenne de 64 %, l'absorption

Fig-19 Relation entre l'absorption et le coefficient de ruissellement du Sierozem



moyenne ne représentant que 36 %. Sachant que dans de nombreux cas l'érosion spécifique est plus forte sur la parcelle II, sans doute en raison de sa plus grande longueur, si l'on prend l'érosion sur la parcelle II,

$$(ESC_I = ESM_{II} \times \frac{Hp_I}{Hp_{II}} = ESM_{III} \times 1,27)$$

on arrive à une absorption moyenne de 46 %.

En étendant le même raisonnement entre la parcelle I et la parcelle III, dont le rapport des longueurs des formations gypseuses est de 3,32, l'érosion spécifique calculée sur la parcelle I s'en trouve fortement augmentée (1.407,2 kg), d'où un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé, qui atteint 81 %, ce qui est plus en accord avec ce que l'on constate pour les sédiments, pour lesquels on observe selon le même calcul le dépôt de 89 % de l'érosion calculée. Notons que cela ne représente cependant pas plus qu'un dépôt de 1,5 mm sur les sierozems ensablés, variation que n'a pu mettre en évidence l'étude de l'érosion sur des placettes à aiguilles (FERSI, ZANTE, 1980).

On peut donc conclure que la plus grande partie du gypse arraché sur les croûtes et encroûtements gypseux n'est pas exporté dans les eaux superficielles. Comme la couverture sableuse ou sablo-limoneuse des sierozems n'en contient pratiquement pas (environ 1 %, d'après BOURGES et al. 1973), on peut penser que le transport et le dépôt du gypse, principalement sous forme dissoute, se fait plutôt au contact des formations gypseuses enterrées et de la couverture, le dépôt incrustant progressivement la base des profils des sierozems, comme le montre les observations et analyses suivantes.

II-5 Essai de localisation des sites d'absorption du gypse

Les résultats de l'étude pédologique préalable (BOURGES et al. 1973) ont été complétée par l'observation de plusieurs séquences de profils implantés directement sur les parcelles étudiées.

Les profils ont été particulièrement localisés à proximité immédiate de la zone gypseuse sur le sierozem tronqué des parcelles I et II, ainsi que plus à l'aval, sur le sierozem ensablé de la parcelle I (figure 20). Les prélèvements ont été volontairement rapprochés dans les horizons sus-jacents à l'encroûtement gypseux.

TOPOSEQUENCE DU DJEBEL DISSA - REPARTITION DES SOLS

(R. PONTANIER ES. N° 89)

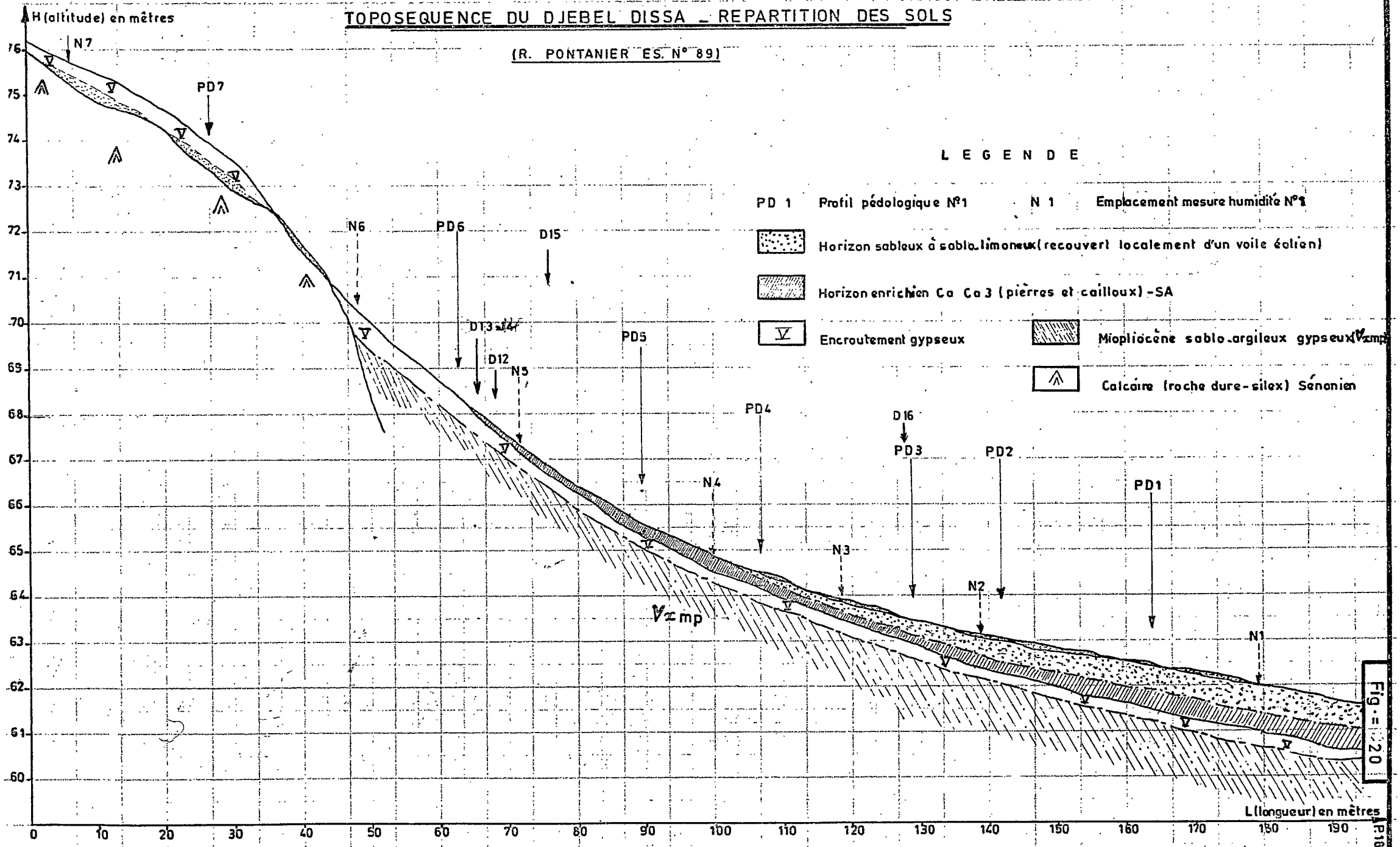


Fig. = 1/20

De plus, des prélèvements systématiques ont été faits en surface (0-2 cm) le long des parcelles I et II, sur les sierozem.

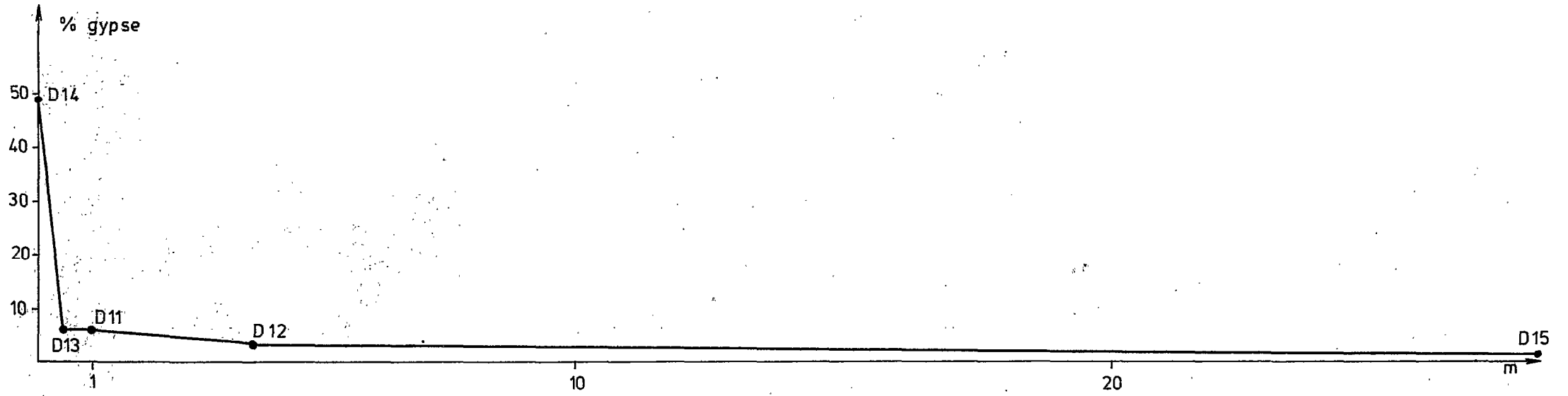
Les résultats de ces nouvelles analyses montrent à l'évidence que le gypse issu des croûtes gypseuses, et non entraîné à l'aval de la toposéquence dans le ruissellement, peut se déposer aussi bien en profondeur, au niveau des discontinuités lithologiques ou pédologiques que, dans une moindre mesure, dans l'horizon superficiel des sierozem.

Dans ce dernier cas, on observe (figure 21) que l'enrichissement superficiel ne dépasse pas quelques mètres à l'aval des croûtes gypseuses, la teneur passant, dans les 2 cm supérieurs, de 7 % à 50 cm, à 3 % à 4 m, pour atteindre 1 % à partir de 30 m. Ce dernier chiffre correspond d'ailleurs à celui des analyses antérieures de profils représentatifs des sierozem (BOURGES et al. 1973).

Dans le cas des dépôts plus profonds, le profil gypseux fait effectivement apparaître des augmentations brutales et très localisées à des tranches de faible épaisseur, non seulement au contact entre le matériau calcaire et l'encroûtement gypseux profond, mais également, semble-t-il, à la limite entre le recouvrement sablo-limoneux du sierozem modal ou ensablé et de ce même matériau calcaire (figure 22).

Ces accumulations atteignent des valeurs remarquables, d'autant plus élevées que les profils sont situés plus à l'aval. On se rappelle en effet que l'absorption de l'eau, et par conséquent des sels dissouts et du gypse en particulier, augmente fortement quand on passe des sierozem tronqués aux sierozem modaux puis aux sierozem ensablés, ce qui est confirmé par l'évolution du bilan d'eau interne (figure 23).

PROFIL LONGITUDINAL DE TENEUR EN GYPSE SUR LA PARCELLE I



PARCELLE I ACCROISSEMENT RELATIF DE LA TENEUR EN GYPSE DANS Hz SUR V
PAR RAPPORT AUX Hzs SUPERIEURS

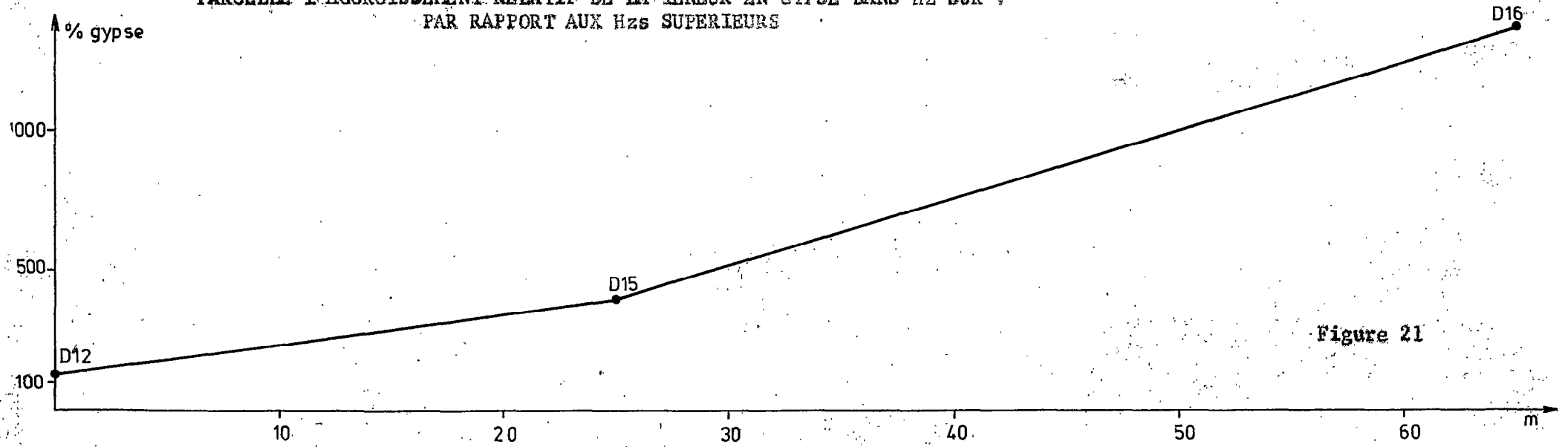
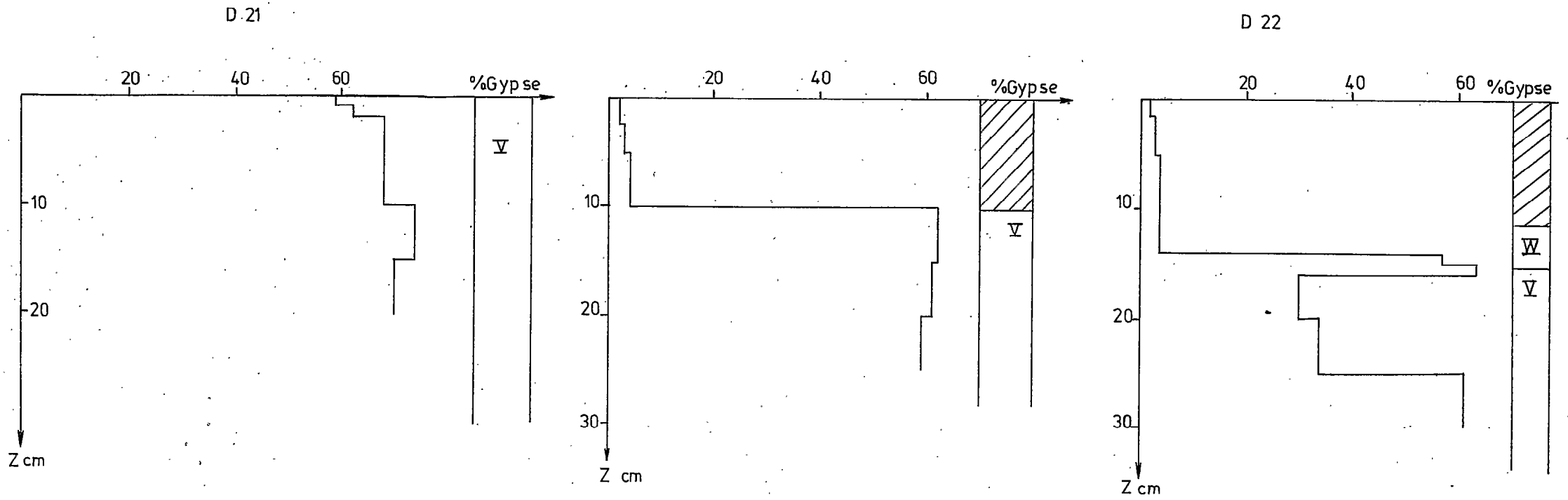


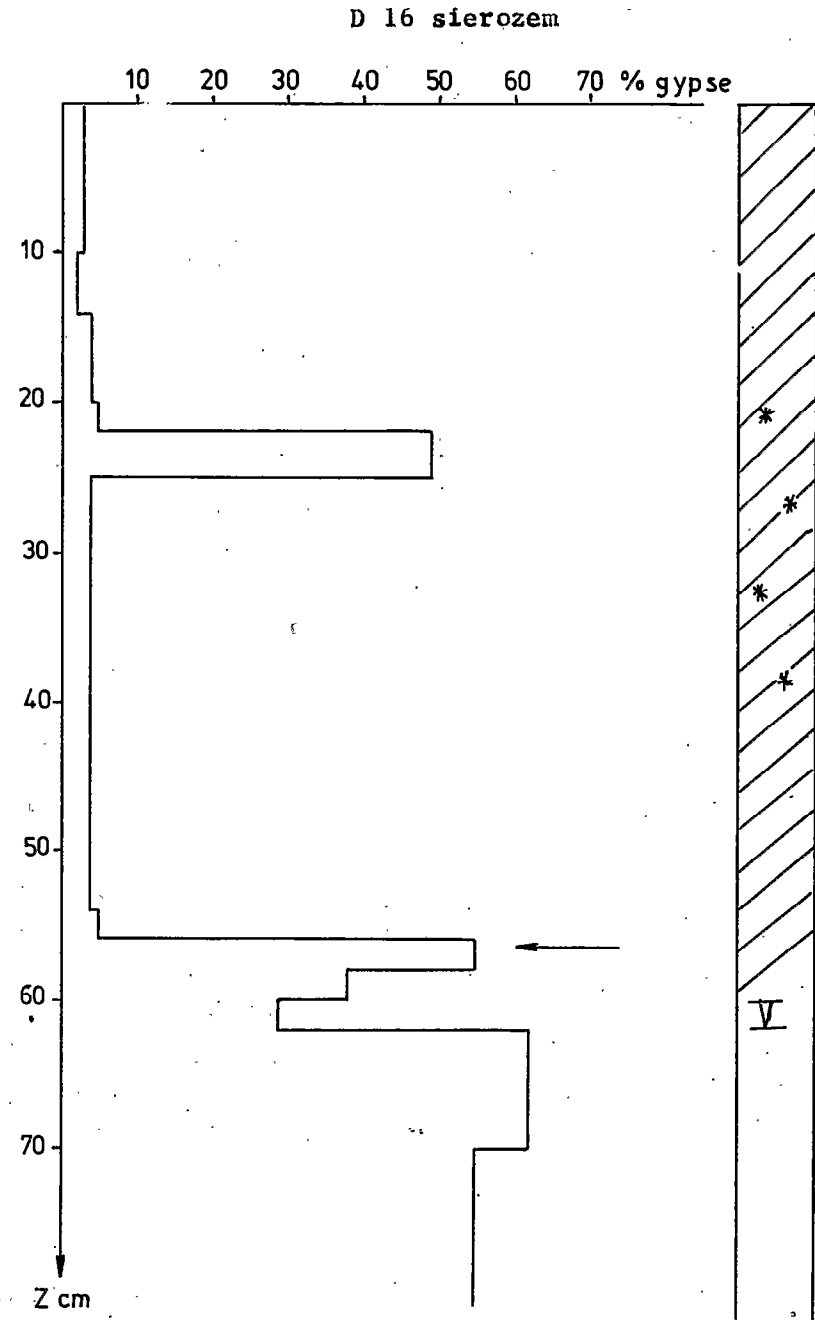
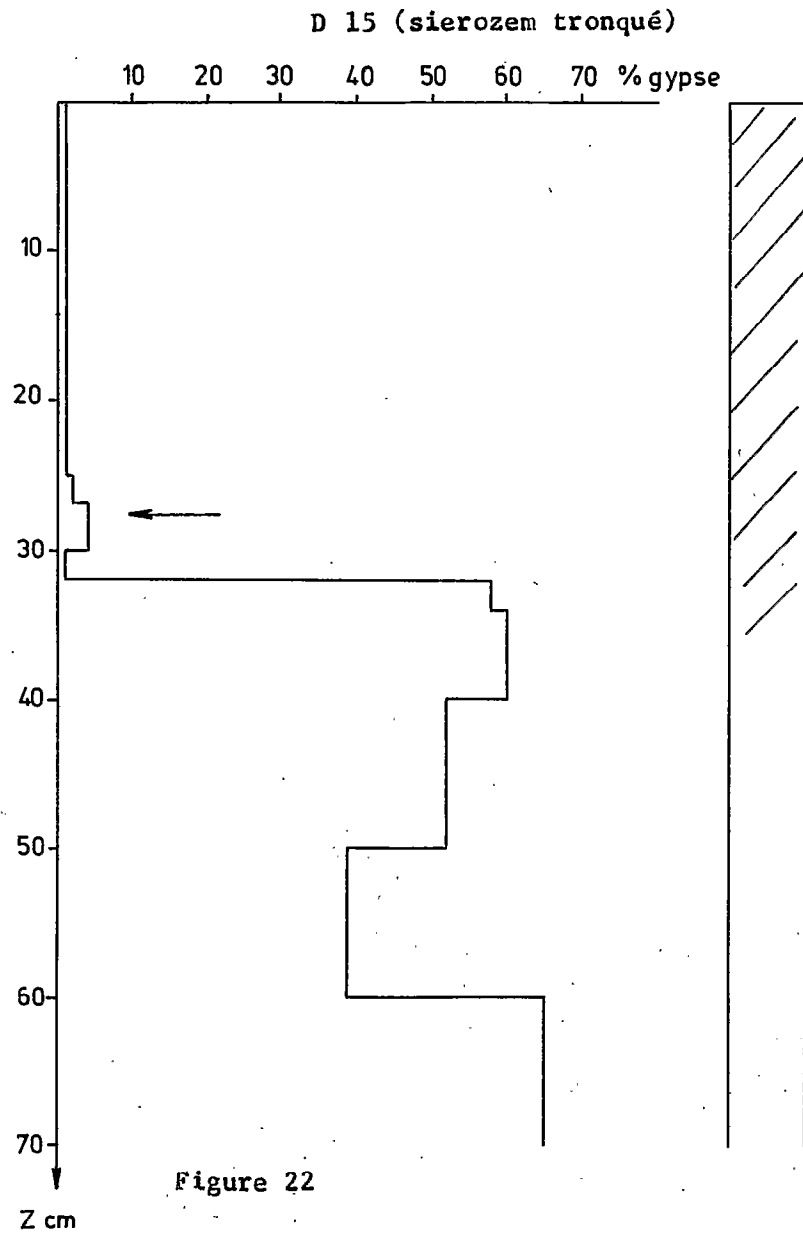
Figure 21

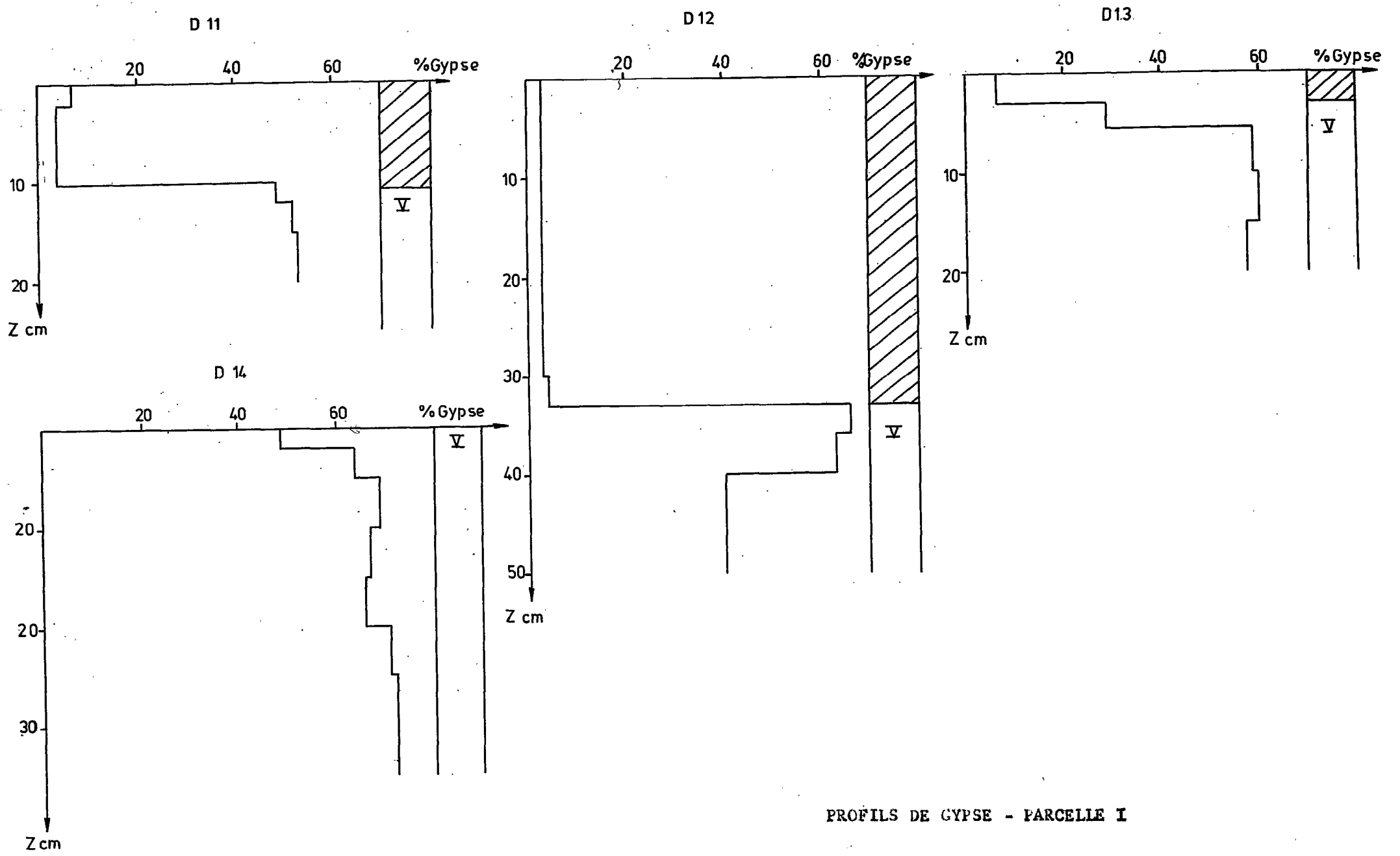


DISSA PARCELLE 2 : PROFILS GYPSE

Figure 22

REPERTITION DU GYPSE DANS LES PROFILS - (PARCELLE 1)



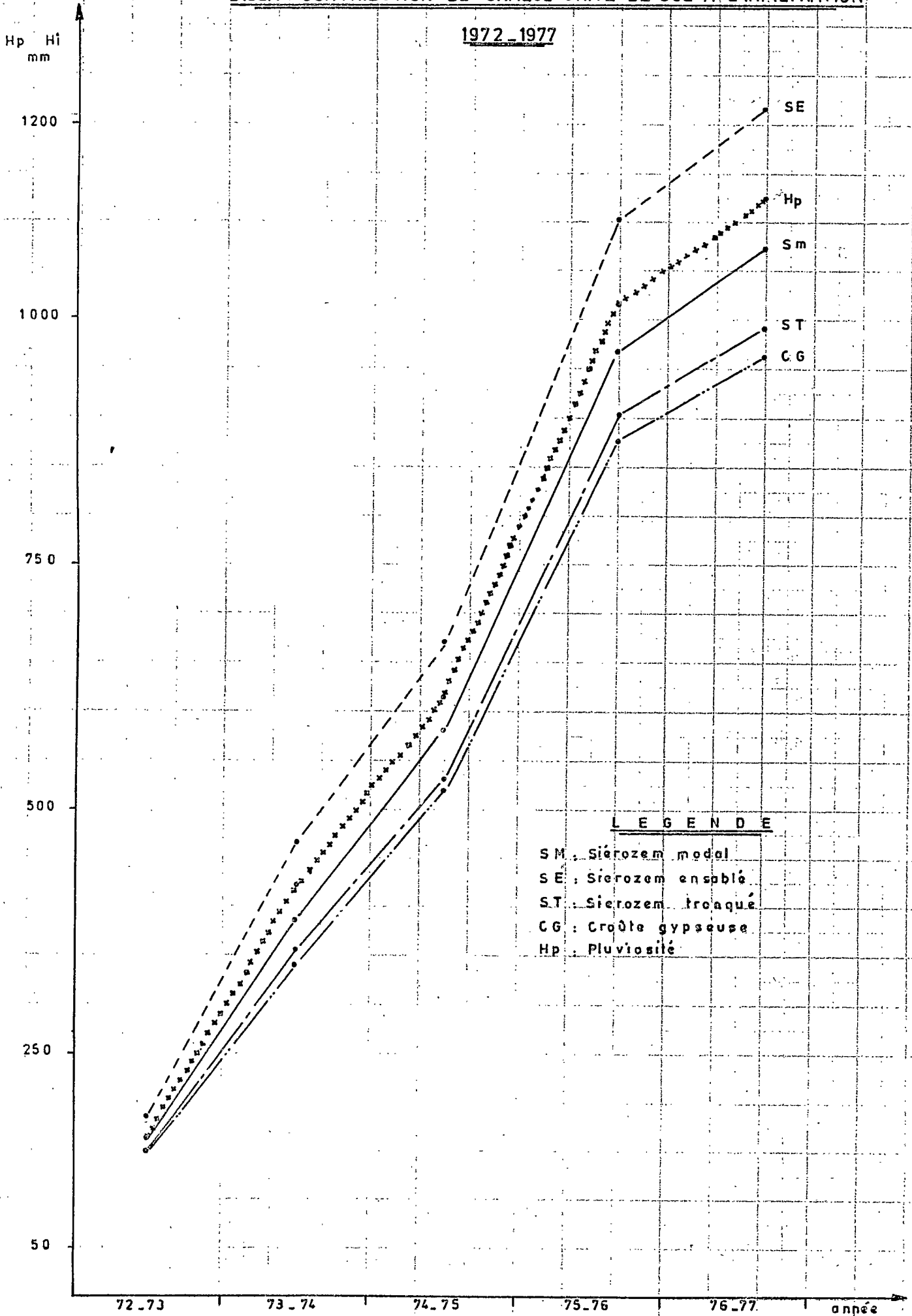


PROFILS DE GYPSE - PARCELLE I

Figure 22

DISSA : CONTRIBUTION DE CHAQUE UNITE DE SOL A L'INFILTRATION

1972-1977



CONCLUSION

Il serait bien sûr hasardeux de tenter de relier les quantités de gypse soustraites au ruissellement à l'accroissement des dépôts stratifiés observés.

Il n'en reste pas moins que ces transferts à partir d'un amont gypseux, bien qu'ils soient apparemment faibles, ont certainement une incidence sur la formation et l'accroissement des encroûtements gypseux à la base des sierozem, concurremment avec l'érosion mécanique qui arrache la couverture et permet le durcissement de leur partie supérieure en croûte gypseuse.

On peut en conclure que le développement des croûtes et encroûtements de surface des sols calcimagnésiques gypseux est directement en rapport avec l'érosion, tant mécanique et résultant de l'ablation des couvertures ou des horizons sablo-limoneux et sablo-argileux, que chimique, résultant de la dissolution du gypse sur les encroûtements précédemment formés. On a en effet noté antérieurement que l'encroûtement sous-jacent en formation est d'autant plus riche en gypse que les horizons supérieurs sont plus minces (VIEILLEFON, 1976).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOURGES J., FLORET Ch., PONTANIER R., 1973
Etude d'une toposéquence type du Sud tunisien - Djebel Dissa
(saison 72-73). ES 89 DRES-ORSTOM

- BOURGES J., FLORET Ch., PONTANIER R., 1975
Etude d'une toposéquence type du Sud tunisien - Djebel Dissa
(saison 73-74). ES 93 DRES-ORSTOM

- BUREAU P., ROEDERER P., 1961
Contribution à l'étude des sols gypseux du Sud tunisien.
Bull. A.F.E.S. pp. 150-176

- FERSI M., ZANTE P., 1979
Etude d'une toposéquence type du Sud tunisien Djebel Dissa
(saison 74-75, 75-76, 76-77) ES 159 DRES-ORSTOM

- FERSI M., ZANTE P., 1980
Pluviométrie, bilan hydrique, érosion.
Rapport final. ES 184 DRES-ORSTOM

- LE HOUEROU H.N., 1969
Etude des sols du Sud tunisien. Ann. Agron. 11,3 pp. 241-310

- VIEILLEFON J., 1976
Inventaire critique des sols gypseux en Tunisie.
ES 98 DRES-ORSTOM

- VIEILLEFON J., 1979
Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols
gypseux. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., XVII 3 pp. 195-223.